



# Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains

Aurélie Lamé

## ► To cite this version:

Aurélie Lamé. Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains. Sciences de la Terre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013. Français. NNT : 2013ENMP0071 . pastel-00973861

**HAL Id: pastel-00973861**

**<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00973861>**

Submitted on 4 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 398: Géosciences et Ressources Naturelles

**Doctorat ParisTech**

**T H È S E**

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris**

**Spécialité “ Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives ”**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Aurélie LAMÉ**

le 10 décembre 2013

**Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et  
impacts des aménagements du sous-sol sur  
les écoulements souterrains**

Directeurs de thèse : **Emmanuel LEDOUX, Patrick GOBLET**  
Co-encadrement de la thèse : **Anne-Marie PRUNIER-LEPARMENTIER**

**Jury**

**M. Benoit DEFFONTAINES**, Professeur, Université de Marnes la Vallée, GTMC  
**M. Emmanuel GILLE**, Maître de Conférences, HDR, Université de Lorraine, CEGUM  
**M. Patrick GOBLET**, Directeur de Recherche, MINES ParisTech, Géosciences  
**M. Emmanuel LEDOUX**, Directeur de Recherche, MINES ParisTech, Géosciences  
**M. Jean-Marie MOUCHEL**, Professeur, UPMC  
**Mme Anne-Marie PRUNIER-LEPARMENTIER**, Docteur, Inspection Générale des Carrières de Paris

Président  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

**T  
H  
È  
S  
E**









# Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce travail de thèse. Merci à mes directeurs, Patrick Goblet et particulièrement à Emmanuel Ledoux, pour m'avoir accompagnée lors de la création du modèle ainsi que pour m'avoir prodigué ses précieux conseils de rédaction. Je lui en serai toujours reconnaissante.

Un grand merci à Anne-Marie Prunier-Leparmentier, chef de la Division Inspections, Cartographie, Recherches et Etudes de l'Inspection Générale des Carrières de Paris, pour m'avoir fait confiance au cours de ces années de thèse. J'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec elle et ai appris énormément à ses côtés. Dorénavant, je ne me baladerai plus dans Paris sans penser aux piézomètres. Elle m'a aidée à percer certains secrets des tréfonds parisiens en me permettant de visiter les carrières lutétiennes aux multiples facettes.

Merci à Olivier David, adjoint à l'inspecteur général des carrières de Paris jusqu'en 2009, pour m'avoir permis de commencer cette thèse, à Xavier Piccino, son successeur jusqu'en 2012 et enfin à Albin Guyon, adjoint à l'inspecteur général des carrières de Paris actuel, pour m'avoir permis de la finir. Je ne les remercierai jamais assez pour leur accueil.

Un grand merci pour la coopération professionnelle de l'ensemble du personnel de l'Inspection Générale des Carrières de Paris (IGC) et plus particulièrement à Emmanuel Herrou pour ses conseils avisés dans le maniement des SIG, à Madeleine Schönberg pour sa collaboration « piézométrique », à Thierry Célaudon pour m'avoir permis de suivre des chantiers, à Marc Baboolall pour m'avoir fait découvrir le monde des consolidations de carrières avec une petite frayeur à proximité d'un fontis, à Jules Querleux pour m'avoir permis de l'accompagner dans les carrières, à Zinou Zéglil pour avoir eu la patience de m'écouter parler du sous-sol parisien durant de nombreuses heures et à toute l'équipe de la brigade pour ne pas m'avoir « perdue » dans les carrières.

Je remercie également la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens), et plus particulièrement François Mirouze, Responsable du groupe des Visites et Inspections des ouvrages d'art et Pascal Vanel, responsables de l'entité « calculs des sols et structures », pour leur collaboration professionnelle et pour leur accueil sympathique.

Merci à la Section de l'Assainissement de Paris (SAP), en particulier Thomas Walliser, Chef de la Division Qualité-Développement du Service Technique de l'Eau et de l'Assainissement, pour m'avoir informée de la situation des eaux d'exhaures à Paris.

Merci au service des Déplacements de la Direction de la Voirie et des Déplacements pour leur collaboration technique vis-à-vis des parkings publics concédés par la Ville de Paris.

Des remerciements plus personnels maintenant.... merci à mes parents, à ma sœur et à mon frère pour leur soutien inconditionnel et la patience dont ils ont fait preuve lorsqu'ils m'écoutaient attentivement parler de ma thèse, alors que le sujet est bien éloigné de leur domaine d'activité. Merci à mes amis (Marion, Géraldine, Gwénaél, Nathalie, Mike, François ...) d'avoir toujours été là lorsque j'en avais besoin. Merci aux filles du volley-ball, pour ces bons moments passés sur un terrain où je pouvais me changer les idées tout en faisant retentir notre cri de guerre. Et enfin un grand merci à Guillaume pour sa présence, sa patience, ses encouragements et surtout pour m'avoir supportée dans les moments délicats.



Infiltration d'eau dans une carrière

# Sommaire

<b>Remerciements .....</b>	<b>1</b>
<b>Sommaire .....</b>	<b>3</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>7</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>15</b>
 <b>Introduction.....</b>	 <b>17</b>
 <b>Partie 1:Contexte géologique et hydrogéologique parisien .....</b>	 <b>19</b>
<b>1.Géologie .....</b>	<b>21</b>
1.1.Histoire des formations géologiques parisiennes.....	21
1.2.Contexte structural régional.....	23
1.3.Litho-stratigraphie des formations géologiques .....	26
1.3.1.Les formations secondaires .....	26
1.3.2.Les formations tertiaires.....	27
1.3.3.Les formations superficielles.....	40
1.3.4.Synthèse générale.....	42
<b>2. Hydrogéologie.....</b>	<b>45</b>
2.1. Aquifères parisiens.....	45
2.1.1. Caractéristiques hydrogéologiques des formations.....	45
2.1.2. Synthèse des nappes .....	55
2.2. Réseau hydrographique .....	57
2.2.1. La Seine .....	57
2.2.2. La Marne .....	60
2.2.3. Les canaux .....	60
2.2.4. La Bièvre .....	61
2.2.5. Les lacs .....	62
2.2.6. Les rûs.....	63
2.2.7. Les anciennes sources .....	63
2.2.8. Le réseau d'assainissement.....	64
2.2.9. Synthèse du réseau hydrographique .....	70
2.3. Fonctionnement du système hydrogéologique parisien .....	71
2.3.1 Recharges .....	71

2.3.2. Prélèvements.....	79
2.4. Situation piézométrique.....	84
2.4.1. Le passé.....	84
2.4.2. Le présent.....	94
2.4.3. Evolution temporelle piézométrique .....	108
2.5. Synthèse du fonctionnement des aquifères parisiens.....	113
2.5.1 Tentative de bilan sur la zone d'étude.....	113
2.5.2. Rôle de l'Albien sur les nappes parisiennes.....	114
2.5.3. Relations des nappes parisiennes entre elles .....	117
<b>3. Bâti souterrain et nappes .....</b>	<b>118</b>
3.1. Structures souterraines en interaction avec les nappes.....	118
3.1.1. Métro, Réseau Express Régional et stations .....	118
3.1.2. Bâtiments souterrains .....	120
3.1.3. Carrières.....	122
3.1.4. Autres structures souterraines pouvant influencer les nappes ...	124
3.1.5. Interactions entre les structures souterraines et les nappes.....	125
3.2. Désordres sur le patrimoine bâti provoqués par les nappes .....	128
3.2.1 Dissolution du gypse antéludien .....	130
3.2.2. Tassements différentiels .....	133
3.2.3. Déstabilisation de fondations anciennes .....	134
3.2.4. Attaques sulfatiques .....	134
3.2.5. Ennuyage de sous-sol par remontée de nappe.....	137
3.2.6. Crues.....	138
<b>Partie 2: Conceptualisation de l'hydrogéologie parisienne.....</b>	<b>141</b>
<b>1. Création d'un SIG.....</b>	<b>143</b>
1.1. Bases de données existantes et éléments utilisés.....	143
1.1.1. La géologie .....	143
1.1.2. Le bâti sous-terrain .....	146
1.1.3. Les transports ferroviaires souterrains .....	147
1.1.4. Synthèse des infrastructures souterraines .....	148
1.2. Visualisation des interférences bâti souterrain – nappes .....	150
<b>2. Construction du modèle hydrogéologique .....</b>	<b>151</b>
2.1. Structure du système aquifère multicouche.....	151
2.2. Maillage.....	151

2.3. Conditions aux limites .....	156
2.4. Base de données du modèle hydrodynamique.....	157
<b>Partie 3: Modélisation numérique hydrogéologique des aquifères parisiens .....</b>	<b>163</b>
<b>1. Type de modélisation .....</b>	<b>165</b>
1.1. Code NEWSAM .....	165
1.2. Chaîne de modélisation.....	166
<b>2. Simulations .....</b>	<b>168</b>
2.1. Simulation initiale .....	168
2.2. Simulations exploratoires de calage .....	174
2.2.1. Chaîne de modélisation utilisée pour le calage du modèle.....	174
2.2.2. Calage exploratoire du modèle .....	175
2.2.3. Résultat de la simulation après calage.....	179
<b>3. Conclusion du calage et perspectives de la modélisation.....</b>	<b>183</b>
 <b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	 <b>185</b>
 <b>Bibliographie.....</b>	 <b>187</b>
<b>Liste des annexes.....</b>	<b>193</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>195</b>





# Liste des Figures

Figure 1. 1: Carte géologique simplifiée du Bassin Parisien, d'après la synthèse géologique du Bassin de Paris (Mégnien et al.,1980) et la carte géologique de la France au 1/1 000 000ème (6ème ed., 1996) .....	21
Figure 1. 2: Principaux cycles sédimentaires à l'Eocène-Oligocène dans le Bassin parisien (Ch. Pomerol).....	22
Figure 1. 3: Carte tectonique du Bassin Parisien d'après Ch. Pomerol & L. Feugueur, 1986 et J.P. Gély, 2009) .....	24
Figure 1. 4: Coupe géologique Nord-Sud de Paris .....	25
Figure 1. 5: Schéma paléogéographique du nord-ouest de l'Europe au Crétacé supérieur.....	27
Figure 1. 6: Extension du Dano-Montien dans le Bassin Paris. La communication entre la Champagne et la région parisienne demeure hypothétique. (C. Pomerol & L. Feugueur, 1986) .....	28
Figure 1. 7: Extension des principaux faciès du Sparnacien dans le Bassin Parisien. (L. Feugueur, 1986) .....	29
Figure 1. 8: Extension du Cuisien dans le Bassin de Paris. Ch. Pomerol, L. Feugueur (1986) .....	30
Figure 1. 9: Extension du Lutétien Inférieur (C. Pomerol et L. Feugueur, 1986). .....	32
Figure 1. 10: Coupe géologique synthétique du Lutétien dans le Bassin Parisien (J-P Gély, 2009).....	33
Figure 1. 11: Extension du Lutétien Supérieur (C. Pomerol et L. Feugueur, 1986).....	34
Figure 1. 12: Extension de l'Auvervien dans le Bassin Parisien (C. Pomerol, 1995) .....	35
Figure 1. 13: Extension des sables marins de Cresnes et des calcaires laguno-lacustres de Saint-Ouen (C. Pomerol, 1995) .....	36
Figure 1. 14 : Extension du Ludien dans le Bassin de Paris (C. Pomerol, 1995) .....	37
Figure 1. 15: Extension du Stampien dans le Bassin Parisien (C. Pomerol, 1995) .....	40
Figure 1. 16: Coupe WSW-ENE du 13 <sup>e</sup> arrondissement parisien.....	42
Figure 1. 17: Tableau synthétique des formations géologiques parisiennes.....	43
Figure 1. 18: Carte géologique de Paris et de sa proche banlieue réalisée grâce à 17 772 sondages géologiques.....	44

Figure 1. 19: Colonne stratigraphique simplifiée de Paris d'après Thierry et al. (2009) associée aux valeurs médianes des perméabilités des formations hydrogéologiques parisiennes.....	46
Figure 1. 20: Extension de la nappe de la Craie sur la zone d'étude. ....	48
Figure 1. 21: Extension de la nappe de l'Yprésien inférieur et de son substratum d'Argile Plastique sur la zone d'étude.....	49
Figure 1. 22: Extension de la nappe de l'Yprésien supérieur et de son substratum (Fausses Glaises) sur la zone d'étude. ....	50
Figure 1. 23: Extension des formations géologiques pouvant contenir la nappe du Lutétien sur la zone d'étude.....	51
Figure 1. 24: Extension des formations géologiques pouvant contenir la nappe du Bartonien sur la zone d'étude. ....	52
Figure 1. 25: Extension des formations géologiques pouvant contenir la nappe des Sables de Fontainebleau - Travertin de Brie sur le substratum des Glaises vertes dans la zone d'étude. ....	53
Figure 1. 26: Structure du substratum de la plaine alluviale à Paris (Diffre, 1969).....	54
Figure 1. 27: Extension des alluvions pouvant contenir la nappe la nappe alluviale sur la zone d'étude.. ....	55
Figure 1. 28: Coupe hydrogéologique N-S de Paris. ....	56
Figure 1. 29: Carte de la répartition des températures à moins de 50m de profondeur en février 1977 (André, Diffre, Gringarten et Landel, 1977). ....	58
Figure 1. 30: Localisation des lacs réservoirs du Bassin de la Seine (source : EPTB) ....	59
Figure 1. 31: Canaux parisiens. ....	60
Figure 1. 32: Tracé de la Bièvre. ....	61
Figure 1. 33: Effets d'une fuite de la mare Saint-James sur la nappe de la Craie. ....	62
Figure 1. 34: Carte des anciens rûs parisiens.....	63
Figure 1. 35: Cartographie des sources du Nord (document IGC d'après Tesson).....	65
Figure 1. 36: Types d'égouts parisiens. ....	66
Figure 1. 37: Réseau d'égouts parisiens.....	67
Figure 1. 38: Cartographie du réseau d'eau non potable.....	68
Figure 1. 39: Schéma de production et de distribution de l'eau non potable (SAFEGE). ....	69

Figure 1. 40: Répartition des volumes d'eau du Réseau d'Eau Non Potable. ....	70
Figure 1. 41: Réseau hydrographique parisien. ....	71
Figure 1. 42: Occupation surfacique de Paris. ....	73
Figure 1. 43: Précipitations et pluie efficace à Paris entre 1990 et 2010 (source Météo France). ....	74
Figure 1. 44: Schéma de l'alimentation de nappes par la Seine dans le cas d'une crue (source IGC). ....	76
Figure 1. 45: Effets du débordement de la Seine du 24 janvier 2004 sur les nappes. ....	76
Figure 1. 46: Courbes piézométriques de 5 piézomètres associés à la courbe du niveau de la Seine entre janvier 2006 et mai 2011. ....	77
Figure 1. 47: Carte de la limite d'influence de la Seine sur la piézométrie de la nappe phréatique associée à 268 piézomètres classés selon l'influence du fleuve sur leurs piézométries. ....	78
Figure 1. 48: Rejet d'eau d'exhaure en égouts (source: Ville de Paris) ....	80
Figure 1. 49: Prélèvements d'eau déclarés dans les nappes éocènes et dans la nappe de la Craie à Paris et en proche banlieue. ....	83
Figure 1. 50: Carte piézométrique de Delesse en 1862. ....	86
Figure 1. 51: Carte piézométrique de 1965 (Ph. Diffre). ....	87
Figure 1. 52: Carte d'isodifférences entre la carte piézométrique de Delesse (1858) et la carte piézométrique de Diffre (1965). ....	88
Figure 1. 53: Inondation d'un parking de la rue Bergère (Paris 9e) par remontée de nappe en 1975 (photo : G. BERGER). ....	89
Figure 1. 54: Niveaux piézométriques de la nappe du Lutétien entre 1978 et 1990. ....	90
Figure 1. 55: Carte piézométrique en 1982 associée aux pompages (Colin). ....	91
Figure 1. 56: Carte piézométrique de Paris en 1989 (Prunier-Leparmentier). ....	92
Figure 1. 57: Niveaux piézométriques à proximité des travaux de construction de RER Eole. ....	93
Figure 1. 58: Carte de localisation des piézomètres utilisés en fonction de la nappe mesurée. ....	95
Figure 1. 59: Carte des piézomètres utilisés en fonction de l'origine des données. ....	96
Figure 1. 60 : Carte piézométrique de la nappe des alluvions anciennes en 2010. ....	99
Figure 1. 61: Carte piézométrique de la nappe du Bartonien en 2010. ....	100
Figure 1. 62: Carte piézométrique de la nappe du Bartonien (2010) de la rive droite de Paris. ....	101

Figure 1. 63: Carte piézométrique de la nappe du Lutétien (2010). .....	103
Figure 1. 64: Carte piézométrique de l'Yprésien supérieur en 2010. ....	104
Figure 1. 65: Carte piézométrique de la nappe de l'Yprésien inférieur (2010). ....	106
Figure 1. 66: Carte piézométrique de la nappe de la Craie (2010). ....	107
Figure 1. 67: Carte piézométrique de la nappe phréatique à Paris (2010). ....	109
Figure 1. 68: Carte piézométrique de la nappe phréatique à Paris associée aux prélèvements d'eau (2010). ....	110
Figure 1. 69: Carte d'isodifférences entre la carte de Delesse et la carte piézométrique de 2010. ....	111
Figure 1. 70: Carte d'isodifférences entre la piézométrie de la nappe phréatique en 1989 avec piézométrie actuelle (2010). ....	112
Figure 1. 71: Bilans des flux entre les nappes campanienne, albienne et néocomienne en $m^3/an$ . ....	115
Figure 1. 72: Débits d'eau prélevés dans la nappe de l'Albien entre 1840 et 2000. ....	115
Figure 1. 73: Niveau piézométrique de la nappe de l'Albien à Paris 13e entre 1840 et 2000. ....	115
Figure 1. 74: Carte piézométrique de la nappe de l'Albien (Vernoux et al. 1997). ....	116
Figure 1. 75: Carte piézométrique de la nappe de la Craie réalisée par Raoult (1999) avec des données piézométriques issues d'Albinet (1967). ....	116
Figure 1. 76: Evolution des niveaux piézométriques des nappes Eocènes, de la Craie et de l'Albien entre 2000 et 2010. ....	117
Figure 1. 77: Localisation des piézomètres utilisés pour la Figure 1. 76. ....	117
Figure 1. 78: Schéma de l'écoulement d'une nappe en présence d'une infrastructure souterraine. ....	118
Figure 1. 79: Coupe géologique (source RATP) de la ligne 4 et de la station « la Cité » à son passage sous la Seine associée au niveau piézométrique de la nappe des alluvions anciennes. ....	119
Figure 1. 80: Construction de la ligne 14 traversant la nappe du Lutétien sous la place Lachambeaudie (photo : RATP). ....	119
Figure 1. 81: Stations et lignes de transport ferroviaire qui interfèrent avec les nappes. ....	120
Figure 1. 82: Coupe du parking Harlay (source: Solétanche Bachy). ....	121

Figure 1. 83: Parkings et caves interférant avec les nappes dans la situation piézométrique de 2010.....	122
Figure 1. 84: Cartographie des carrières parisiennes. ....	123
Figure 1. 85: Nappe du Lutétien affleurant en carrière (bain des carriers). ....	123
Figure 1. 86: Fuites de réseaux en carrière (photo A. Lamé et IGC). ....	123
Figure 1. 87: Schéma du forum des Halles avec les niveaux piézométriques des nappes (source: Hydratec). ....	124
Figure 1. 88: Centrale (photo Solétanche Bachy). ....	125
Figure 1. 89: Carte d'occupation du sous-sol parisien. ....	126
Figure 1. 90: Carte des infrastructures souterraines et piézométrie au centre de la rive droite. ....	127
Figure 1. 91: Carte des infrastructures souterraines interférant avec l'écoulement des nappes dans leur situation piézométrique de 2010. ....	127
Figure 1. 92: Carte des infrastructures souterraines associées à la piézométrie de la nappe phréatique. ....	128
Figure 1. 93: Schéma de l'influence du bâti et de l'occupation du sous-sol sur l'écoulement des nappes à Paris. ....	129
Figure 1. 94: Formation d'un fontis à partir des Marnes et Caillasses (Jardin, 1975). ....	130
Figure 1. 95: Coupe stratigraphique du centre du Bassin Parisien présentant les niveaux gypseux antéludiens (Toulemont et al. 1972). ....	130
Figure 1. 96: Fontis dans le gypse antéludien sous la gare du Nord (photo: Solétanche-Bachy) ....	131
Figure 1. 97: Destruction d'habitation causée par une poche de dissolution le gypse antéludien rue Papillon, 9 <sup>e</sup> arrondissement (photo: IGC). ....	131
Figure 1. 98: Carte de l'épaisseur des bancs gypseux dans les Marnes et Caillasses et dans le Calcaire de Saint-Ouen. ....	132
Figure 1. 99: (a) Carte de subsidence due au début des pompages, (b) Carte de la remontée totale due à la fin des pompages (Fruneau et al. 2004, 2005). ....	133
Figure 1. 100: Teneurs en sulfates de la nappe de surface. ....	135
Figure 1. 101: Structures souterraines parisiennes susceptibles de subir des attaques sulfatiques. ....	137
Figure 1. 102: Venues d'eau sous la place de la Madeleine résultant d'une remontée des nappes en 1975 (Bergeron et al. 1983). ....	138

Figure 1. 103: Venues d'eau polluée au niveau de la jonction entre un tunnel et une station de métro.....	138
Figure 1. 104: Crue de référence (1910) et crues récentes à la station Paris-Austerlitz (Document Port Autonome de Paris).....	139
Figure 1. 105: Carte de la crue de 1910. En bleu les zones inondées et en rouge les zones de caves inondées (document IGC). ....	140
Figure 2. 1: Carte des 17 772 sondages géologiques utilisés. ....	143
Figure 2. 2: Carte du toit des formations géologique de Paris en 3 dimensions associée à la topographie selon 2 angles de vues différents (échelle verticale multipliée par 15).....	145
Figure 2. 3: Vues tridimensionnelle du bâti parisien avec en jaune les parkings privés et les caves, en rouge les parkings publics et en bleu les bassins réservoirs souterrains. ....	146
Figure 2. 4: Vue tridimensionnelle du réseau ferroviaire souterrain (en violet les station, en rouge le métro et en orange le RER) – échelle verticale multipliée par 15. ....	148
Figure 2. 5: Occupation tridimensionnelle du sous-sol parisien par les parkings, métro et RER associée à la topographie (échelle verticale multipliée par 15). ....	149
Figure 2. 6: Occupation du sous-sol au niveau de la Place de l'Etoile. ....	149
Figure 2. 7: Représentation tridimensionnelle des structures souterraines parisiennes et du toit de la nappe phréatique (en bleu) selon 3 angles de vue différents – vue de dessus, vue à l'horizontale et vue par en dessous (échelle verticale multipliée par 15).....	150
Figure 2. 8: Extension des 6 premières couches du modèle incluant les zones naturellement asséchées.....	152
Figure 2. 9: Extension des 5 dernières couches du modèle incluant les zones naturellement asséchées.....	153
Figure 2. 10: Extension des entités hydrogéologiques du modèle (vue 2D).....	154
Figure 2. 11: Couches 2 et 3 sans les mailles naturellement asséchées figurées en gris. ....	154
Figure 2. 12: Cartographie des couches du modèle (2D). ....	155
Figure 2. 13: Bloc en 3 dimensions du modèle. ....	156
Figure 2. 14: Bloc en 3 dimensions du modèle sans les alluvions et la Seine.....	156
Figure 2. 15: Cartographie de l'occupation au sol projetée sur le maillage. ....	159

Figure 2. 16: Cartographie du réseau ferroviaire souterrain projeté sur les mailles. ....	159
Figure 2. 17: Cartographie de l'occupation du sous-sol par les parkings, les caves et les stations ferroviaires projetée sur le maillage. ....	160
Figure 2. 18: Cartographie de l'occupation du sous-sol par toutes les structures souterraines projetée sur le maillage.....	160
Figure 3. 1: Discrétisation du système aquifère en couches et mailles. ....	165
Figure 3. 2: Chaîne de modélisation décrivant la construction des fichiers de paramètres, le calcul des niveaux piézométriques et la constitution des fichiers exploitables par le SIG. ....	168
Figure 3. 3: Piézométrie simulée de la nappe des alluvions anciennes avec les paramètres initiaux.....	171
Figure 3. 4: Piézométrie simulée de la nappe du Bartonien avec les paramètres initiaux. ....	171
Figure 3. 5: Piézométrie simulée de la nappe du Lutétien avec les paramètres initiaux. ....	172
Figure 3. 6: Piézométrie simulée de la nappe de l'Yprésien supérieur avec les paramètres initiaux.....	172
Figure 3. 7: Piézométrie simulée de la nappe de l'Yprésien inférieur avec les paramètres initiaux.....	173
Figure 3. 8: Piézométrie simulée de la nappe de la craie avec les paramètres initiaux. ....	173
Figure 3. 9: Chaîne de modélisation incluant la procédure de calage du modèle .....	175
Figure 3. 10: Carte des infrastructures souterraines interférant dans l'écoulement des nappes selon la piézométrie de 1858.....	176
Figure 3. 11: Carte des infrastructures souterraines interférant dans l'écoulement des nappes selon la piézométrie de 1858 et la piézométrie de 2010. ....	176
Figure 3. 12: Zones de modification des débits pompés prélevés. La zone 1 impose un débit pompé par maille de 0,08 l/s et la zone 2 de 0,015 l/s. ....	177
Figure 3. 13: Zone d'alimentation de Belleville par des apports latéraux.....	178
Figure 3. 14: Carte des zones de calage du modèle. ....	179
Figure 3. 15: Simulation de la nappe des alluvions anciennes après calage. ....	180
Figure 3. 16: Simulation de la nappe du Bartonien après calage. ....	180
Figure 3. 17: Simulation de la nappe du Lutétien après calage.....	181
Figure 3. 18: Simulation de la nappe de l'Yprésien supérieur après calage.....	181



Figure 3. 19: Simulation de la nappe de l'Yprésien inférieur après calage. ....	182
Figure 3. 20: Simulation de la nappe de la craie après calage. ....	182

# Liste des Tableaux

Tableau 1. 1:Tableau synthétique des formations yprésiennes.....	31
Tableau 1. 2 : Relations entre l'épaisseur des Marnes et Caillasses et le gypse s'y trouvant.....	34
Tableau 1. 3: Relations entre l'épaisseur du Calcaire de Saint-Ouen et le gypse s'y trouvant. ....	36
Tableau 1. 4: Synthèse de la formation des Masses et Marnes du Gypse.....	38
Tableau 1. 5: Synthèse des formations aquifères parisiennes du Tertiaire et de la Craie. ....	45
Tableau 1. 6: Récapitulatif des perméabilités mesurées à Paris et dans sa proche banlieue.....	47
Tableau 1. 7: Variations de perméabilités dans la Craie.....	48
Tableau 1. 8: Températures moyennes de la Seine à Paris (André et al 1977) .....	57
Tableau 1. 9: Débits moyen (m3/s) de la Seine entre 1993 et 2012 au pont d'Austerlitz (source : Banque hydro).....	58
Tableau 1. 10: Dates de constructions des lacs réservoirs.....	59
Tableau 1. 11: Lacs du Bois de Vincennes. ....	62
Tableau 1. 12: Taux d'occupation des différents types de surfaces. ....	72
Tableau 1. 13: Volumes d'eau pluviale rechargeant les nappes selon les différents types d'occupations du sol. ....	75
Tableau 1. 14: Tableau présentant les différents types de relations entre l'allure des courbes piézométriques de 268 piézomètres et les variations du niveau de la Seine. ....	77
Tableau 1. 15: Volumes d'eau prélevés et déclarés dans la zone d'étude en 2007 (données AESN) et en 2009 (données SAP). ....	82
Tableau 1. 16: Origine des piézomètres en fonction des nappes mesurées. ....	94
Tableau 1. 17: Piézomètres du BRGM utilisés en fonction de l'année de mesure. ....	97
Tableau 1. 18: Récapitulatif des entrées et des sorties quantifiables sur la zone d'étude. ....	113
Tableau 1. 19: Récapitulatif des transmissivités de la zone d'étude.....	114
Tableau 1. 20: Tableau comparatif entre les infrastructures recoupant les nappes et les infrastructures hors nappe.....	126
Tableau 1. 21: Hauteur de crues à l'échelle de Paris Austerlitz (source : DIREN). ....	139
Tableau 2. 1: Récapitulatif des sondages utilisés. ....	144
Tableau 2. 2: Description des données associées aux sondages. ....	146

Tableau 2. 3: Attribut figurant dans le fichier des parkings privés et caves. ....	147
Tableau 2. 4: Données relatives aux parkings concédés par la Ville de Paris. ....	147
Tableau 2. 5: Eléments relatifs au tracé du réseau ferroviaire souterrain. ....	147
Tableau 2. 6: Eléments des fichiers de points indiquant la cote du radier du réseau ferroviaire souterrain. ....	147
Tableau 2. 7: Eléments présents dans la table attributaire des polygones stations. ....	148
Tableau 2. 8: description des onze couches du modèle hydrogéologique. ....	151
Tableau 2. 9: Nombre de mailles par couches. ....	155
Tableau 2. 10: Récapitulatif des éléments de la base de données du modèle. ....	158
Tableau 2. 11: Descriptif des différents paramètres "ep" du Tableau 2.10.....	161
Tableau 3. 1: Valeurs des paramètres initiaux utilisés dans la modélisation (AQ pour aquifère et SP pour semi-perméable). ....	169
Tableau 3. 2: Calcul des différents débits d'infiltration en fonction du type de surface. ....	170

# Introduction

Durant de nombreux siècles, Paris s'est édifié en fonction des matières premières accessibles et de son contexte géologique et hydrogéologique. Aujourd'hui la stratégie d'urbanisation est tout autre et la ville lumière s'est vue dès la fin du 19<sup>e</sup> siècle devenir un véritable gruyère avec un sous-sol fortement urbanisé. Les aménagements souterrains associés à des prélèvements d'eau perturbent considérablement le fonctionnement hydrogéologique des nappes peu profondes.

Depuis 1978, l'Inspection Générale des Carrières de Paris (IGC), service de la Ville de Paris, suit l'évolution des nappes grâce à un réseau piézométrique qui comptait en 2010 305 piézomètres. Au fil du temps, sous l'effet de pressions anthropiques sectorisées, les piézomètres ont enregistré des variations de plus en plus importantes. L'IGC a alors pris l'initiative de mener une étude portant sur une synthèse géologique et hydrogéologique de Paris afin de réaliser au final une modélisation hydrogéologique du sous-sol parisien visant entre autre à identifier quelles sont les relations entre les nappes et le bâti. Cette thèse bénéficiant du dispositif CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche mis en œuvre par l'ANRT) a été engagée en décembre 2009, en collaboration avec le centre de Géosciences de Mines ParisTech, pour mener à bien ce projet.

Lors du déroulement de cette thèse, l'IGC apporta ses connaissances géologiques et hydrogéologiques propres au milieu parisien et le centre de Géosciences un encadrement scientifique pour la modélisation.

Différents organismes acceptèrent de partager leurs informations. Ce sont :

- La RATP pour les données piézométriques, géologiques, géochimiques et cartographiques.
- La Section de l'Assainissement de Paris (SAP) pour les données relatives aux eaux d'exhaure.
- L'entreprise de gestion de parcs de stationnement VINCI Park pour leurs informations concernant leurs eaux d'exhaure.
- La SAEMES (Société Anonyme d'Economie Mixte d'Exploitation du Stationnement de la Ville de Paris) pour leurs volumes annuels d'eau d'exhaure.
- Le Service du Stationnement Concédé (Direction de la Voirie et des Déplacements, Ville de Paris) pour les plans des parkings publics concédés par la Ville de Paris.
- Le Conseil Général de la Seine-Saint-Denis pour leurs données piézométriques.
- L'Agence de l'Eau Seine-Normandie pour m'avoir communiqué leurs données sur les eaux d'exhaures en Île-de-France.

Cette thèse s'articule en trois parties. La première porte sur la géométrie du sous-sol parisien dans son contexte géologique et hydrogéologique. Plusieurs éléments de l'infrastructure souterraine furent intégrés comme les sous-sols profonds, les parkings résidentiels parisiens, les parkings publics concédés par la ville de Paris, les réseaux ferrés du métro et du RER et les réseaux d'égouts. Ce modèle représente la géologie parisienne d'après les cartes géologiques de l'IGC et d'après plus de

20 000 sondages géologiques. Cette représentation tridimensionnelle constitue une base de connaissance innovante, car jusqu'à présent, les éléments du sous-sol parisiens n'avaient jamais été pris en compte simultanément d'une manière synthétique. L'hydrogéologie a été intégrée grâce aux données piézométriques de l'IGC et de la RATP (données de 669 piézomètres implantés pour les premiers en 1974). Le nombre important de piézomètres s'explique par la complexité du système hydrologique parisien constitué par un aquifère multicouche, où chaque couche interfère avec le milieu urbain à une échelle pouvant être parcellaire.

La seconde partie porte sur la conceptualisation de l'hydrosystème aboutissant à un modèle mathématique hydrodynamique maillé de la capitale.

En dernier lieu, la troisième partie décrit la chaîne de modélisation numérique mise au point dans le cadre de cette thèse et présente différentes simulations exploratoires.

## **Partie 1**

# **Contexte géologique et hydrogéologique parisien**



L'hydrogéologie urbaine demande de considérer les nappes à une échelle fine afin de répondre aux préoccupations des constructeurs. Ainsi il est indispensable d'avoir une connaissance approfondie du milieu.

## 1. Géologie

### 1.1. Histoire des formations géologiques parisiennes

Le Bassin Parisien est encadré par le Massif Central, les Vosges, le Massif Armoricain, le Bassin Londonien et le Bassin Bruxellois (Figure 1. 1). Son importante extension géographique est associée à une histoire géologique de près de 250 millions d'années. Les formations géologiques et hydrogéologiques étudiées dans cette thèse, se limiteront aux formations affleurantes dans Paris, donc comprises entre le Cénomanien et l'Holocène.

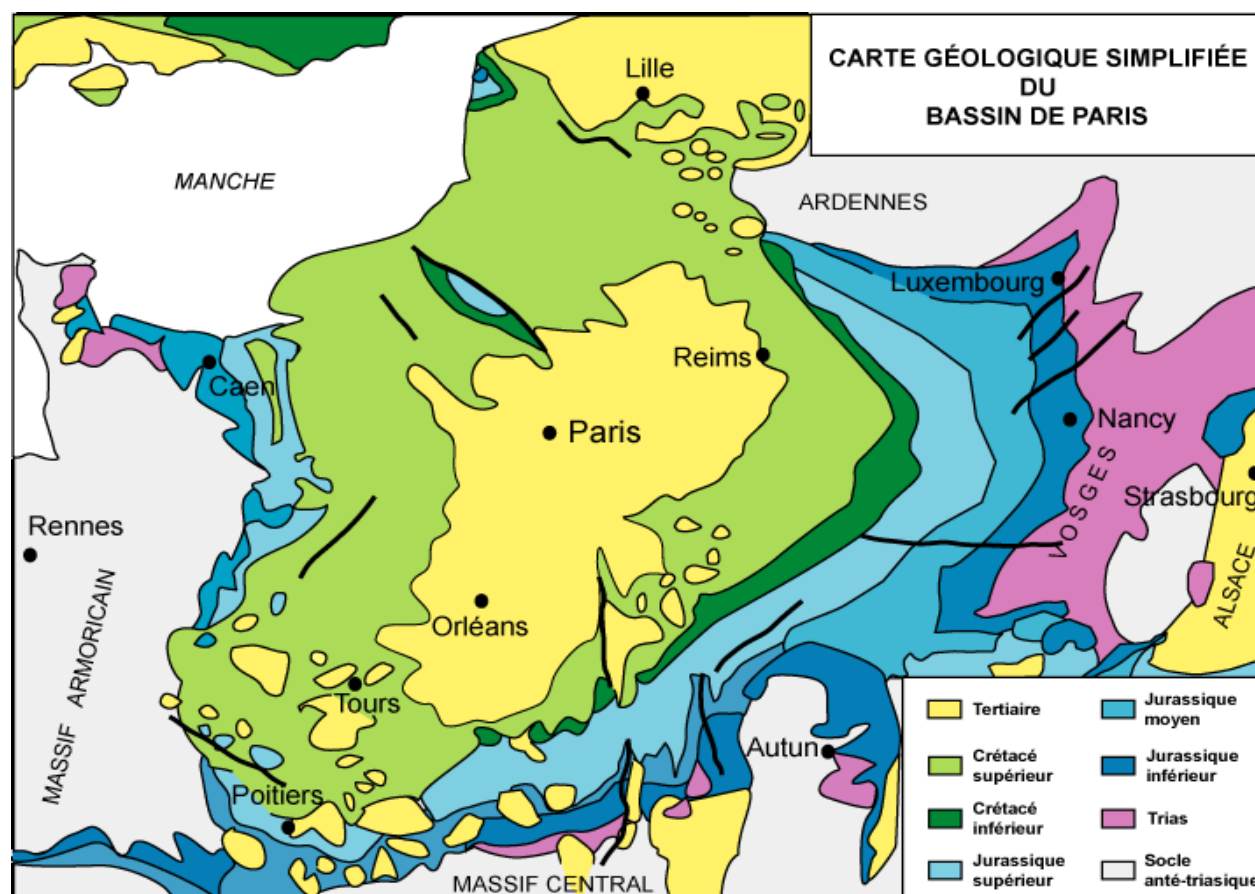


Figure 1. 1: Carte géologique simplifiée du Bassin Parisien, d'après la synthèse géologique du Bassin de Paris (Mégnien et al., 1980) et la carte géologique de la France au 1/1 000 000 (6ème ed., 1996)

Les formations géologiques du Bassin Parisien se sont mises en place à la suite de transgressions et de régressions marines couplées à des mouvements tectoniques. Ces cycles sédimentaires sont relatés dans de nombreux ouvrages (Ch. Pomerol, L. Feugueur...) et sont schématisés dans la Figure 1. 2 .



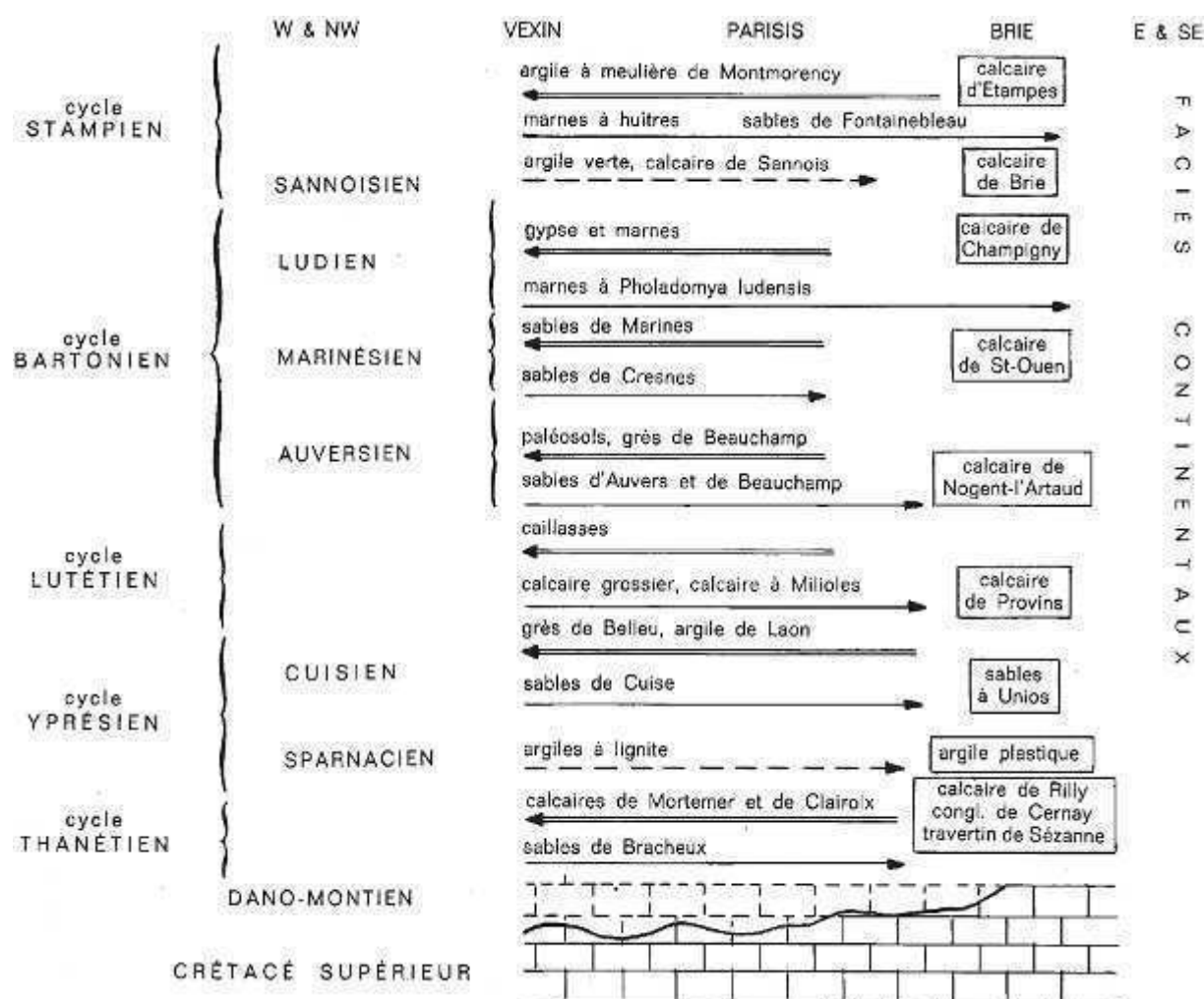


Figure 1. 2: Principaux cycles sédimentaires à l'Eocène-Oligocène dans le Bassin parisien (Ch. Pomerol)

- Au Crétacé inférieur, l'ouverture de l'Atlantique Nord met fin aux tensions crustales résultant de la subsidence (charge sédimentaire et segmentation de la Pangée) du bassin marin épicontinental qui se retrouve alors émergé dans sa partie Nord et régulièrement inondé par la mer au Sud. Cette période est riche en dépôts sableux. Au Crétacé supérieur, la mer envahit de nouveau l'intégralité du bassin et dépose d'épaisses couches de craie (Craie de Meudon) formée par l'accumulation de tests calcaires phytoplanctoniques (coccolithophoridés) où s'intercalent des bancs de silex.
- Au Paléocène, sous la poussée de l'orogénèse alpine, toute la croûte continentale européenne se soulève. Le Sud du Bassin Parisien se retrouve émergé, tandis que sa partie orientale se redresse, courbant les couches sédimentaires et relevant les bords de la cuvette. La mer est alors poussée vers le nord-ouest en favorisant la formation des calcaires coquilliers. En se retirant, elle laissera place à des lagunes déposant des marnes. A la fin du Paléocène, la mer revient, dépose sables et argiles, puis se retire, remplacée par des lacs où sédimentent des calcaires.

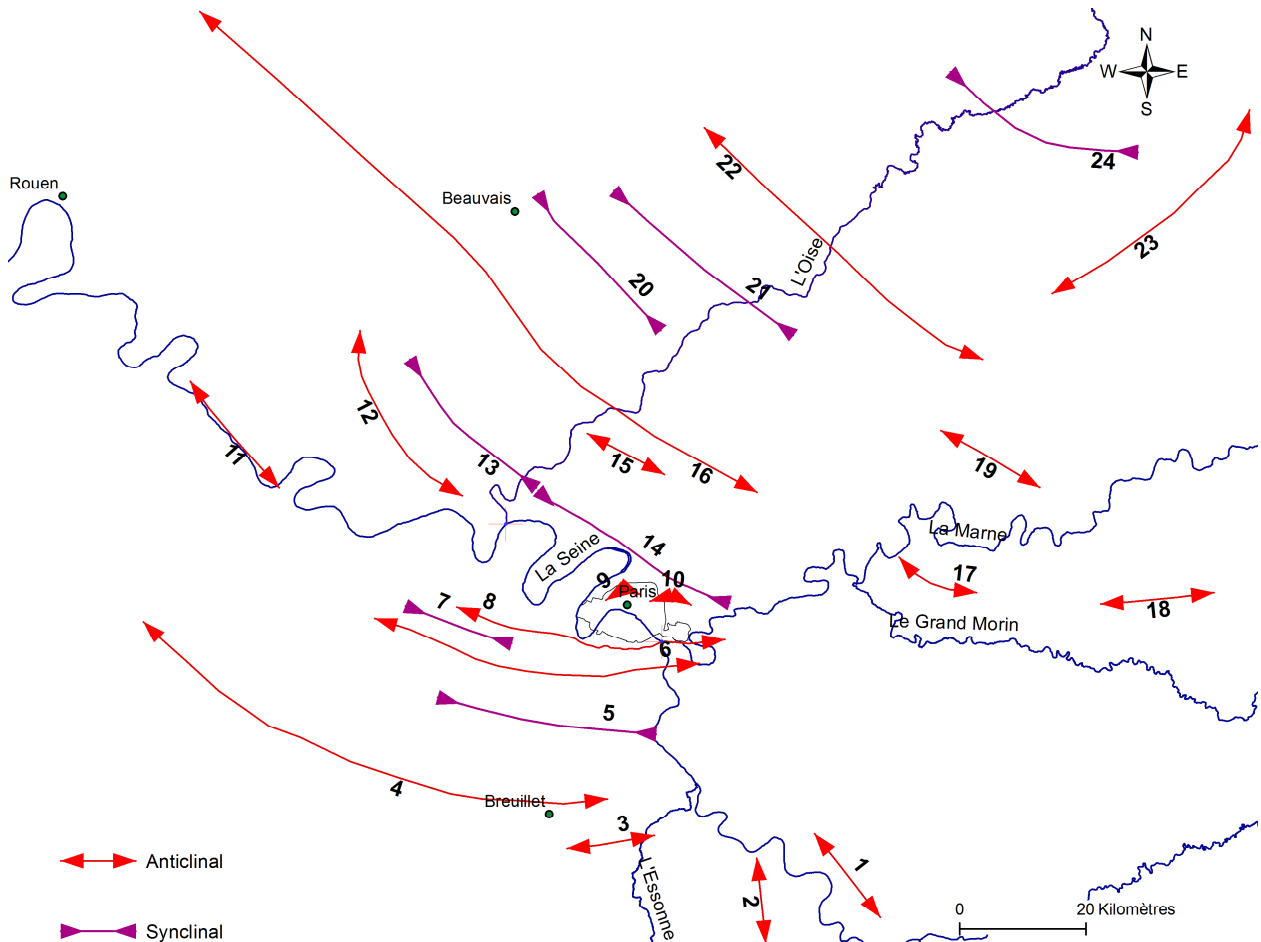
- Au début de l'Éocène, période de transgressions et de régressions marines, la mer, venant du Nord-Ouest, envahit de nouveau le centre du bassin. Sables, argiles et calcaires se déposent, dont les sables de Beauchamp et Calcaires de Saint-Ouen. Laissant place à une lagune centrée sur Paris, elle revient pour la dernière fois pendant l'Oligocène et dépose les sables de Fontainebleau.
- Au Miocène, le réseau hydrographique du Bassin Parisien, se met en place. La Seine, qui en faisait déjà partie, s'écoulait à un emplacement différent de l'actuel.
- Au Pliocène, la région se soulève. La Seine se retrouve alors exposée à une pente plus importante, accélérant ainsi l'érosion des couches sédimentaires sous-jacentes. C'est le début de la formation des coteaux de Seine qui met à jour la craie du Crétacé. L'érosion des terrains favorise la formation de cuvettes et de buttes témoins.
- Lors des dernières glaciations du Pléistocène le niveau de la mer baisse en confortant l'encaissement du puissant fleuve qu'est à cette époque la Seine. Des alluvions se déposent dans les anciens méandres du cours d'eau formant les terrasses hautes.
- L'Holocène marque la fin des glaciations. La Seine voit son débit fortement diminuer, ce qui favorise le dépôt d'alluvions de plus en plus fines jusqu'au lit actuel avec les alluvions modernes.

### 1.2. Contexte structural régional

Au cours de leur histoire, les formations géologiques parisiennes ont subi des déformations tectoniques importantes. Ces dernières se sont effectuées d'une manière discontinue avec des périodes calmes suivies d'épisodes paroxiques. Ces phénomènes ont influencé la disposition, la nature et les épaisseurs des sédiments parisiens.

Les formations tertiaires subissent depuis l'origine de leurs dépôts à la fin du Crétacé des compressions qui suivent deux directions. La première est orientée NE-SO et la seconde NO-SE. Elles résultent, d'après Cavelier et Pomerol (1979), de deux événements: la tectonique alpine et la tectonique pyrénéenne (ou pré-alpine). Ces deux épisodes tectoniques ont déformé le Bassin Parisien, du Thanétien au Lutétien et de la fin de l'Auvervien jusqu'à la fin du Ludien Moyen. Depuis, seule la tectonique alpine joue un rôle (encore aujourd'hui) avec un épisode culminant au Ludien moyen.

Ces deux événements tectoniques ont permis la mise en place d'une trame très fine d'ondulations anticlinales et synclinales selon deux orientations principales: NO-SE et NE-SO (Figure 1. 3). Il existe une série de plis d'orientation intermédiaire qui peut être mise en relation avec les deux épisodes tectoniques. Ces ondulations peuvent être de tailles centimétriques à kilométriques (Annexe 1. 1 et Annexe 1. 2).



1 - Anticlinal de Valence-en-Brie ; 2 - Anticlinal de Chailly-en-Bière-Chartrettes ; 3 - Anticlinal de l'Esne ; 4 - Anticlinal de la Remarde ; 5 - Synclinal de l'Eure ; 6 - Anticlinal de Beynes ; 7 - Synclinal du Rû de Gailly ; 8 - Anticlinal de Meudon ; 9 - Anticlinal de Montmartre ; 10 - Anticlinal de Romainville ; 11 - Anticlinal de Vernon ; 12 - Anticlinaux de la Chapelle-en-Vexin et de Vigny ; 13 - Synclinal de la Viosne ; 14 - Synclinal de la Seine ; 15 - Anticlinal de Ronquerolles - Louvres ; 16 - Anticlinal du Pays de Bray ; 17 - Anticlinal de Coulommès ; 18 - Anticlinal de Montmirail ; 19 - Anticlinal de l'Orsois ; 20 - Synclinal du Thérain ; 21 - Synclinal de l'Automne ; 22 - Anticlinal de Margny-lès-Compiègne ; 23 - Anticlinal du Laonnois ; 24 - Synclinal du massif de Saint-Gobain

**Figure 1. 3: Carte tectonique du Bassin Parisien d'après Ch. Pomerol & L. Feugueur, 1986 et J.P. Gély, 2009)**

Au niveau de l'Ile de France, deux grands axes tectoniques prédominent: au sud, l'Anticlinal de Meudon, et au nord, le Synclinal de la Seine.

L'Anticlinal de Meudon correspond au prolongement de l'Anticlinal de Vernon qui s'amorce au nord de Rouen. Il passe juste au sud de Paris sans franchir le périphérique, traverse la Seine au niveau d'Ivry-sur-Seine et la Marne à Maisons-Alfort et à Joinville-le-Pont. Il disparaît à Champigny.

Le Synclinal de la Seine s'enracine près de Dieppe, passe par Pontoise (Synclinal de la Viosne) et Saint-Denis où il forme la Fosse Saint-Denis qui s'étend jusqu'à Villemomble. A l'Est de Paris, le synclinal passe à proximité de Meaux avant de venir mourir sous les contreforts de la Brie (R. Soyer).

Entre ces deux axes tectoniques, nous avons constaté une inclinaison moyenne des formations géologiques de 8 % orientées vers le NE (Figure 1. 4). Cette valeur a été déterminée d'après les altitudes du toit de la Craie de Meudon, seule formation présente sous la totalité de Paris.

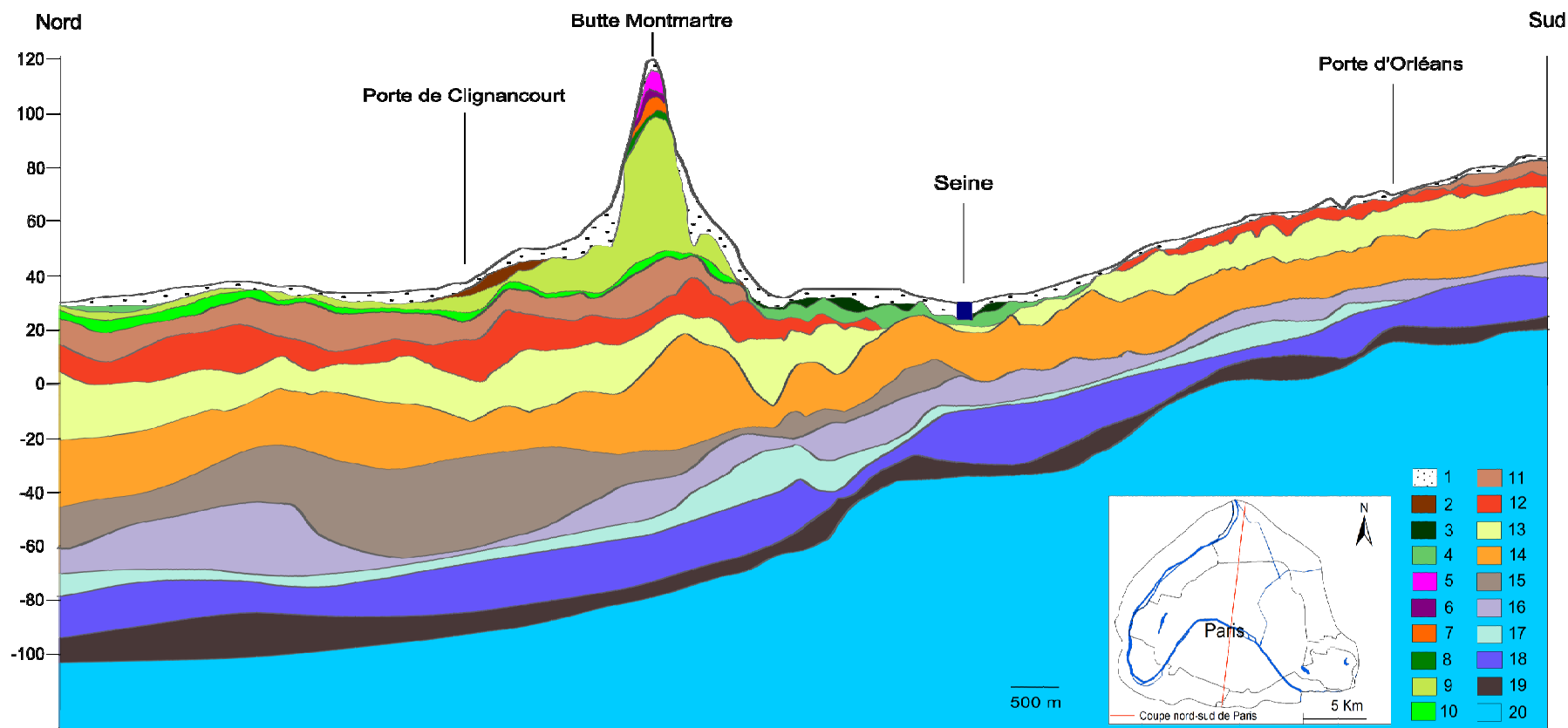


Figure 1. 4: Coupe géologique Nord-Sud de Paris

1 : Remblais – 2 : Eboulis – 3 : Alluvions modernes – 4 : Alluvions anciennes – 5 : Sables de Fontainebleau – 6 : Marnes à huîtres – 7 : Travertin de Brie – 8 : Glaises Vertes – 9 : Masses et Marnes du Ludien Infragypseuses – 10 : Sables Verts – 11 : Calcaire de Saint-Ouen – 12 : Sables de Beauchamp – 13 : Marnes et Caillasses – 14 : Calcaire Grossier – 15 : Sables Supérieurs et Sables de Cuise – 16 : Fausses Glaises – 17 : Sables d'Auteuil – 18 : Argile Plastique – 19 : Marnes de Meudon – 20 : Craie de Meudon.

La rive droite de la Seine à Paris est affectée par deux petits plis (Anticlinal de Montmartre et Anticlinal de Romainville). Ces derniers semblent être le prolongement des anticlinaux de la Chapelle-en-Vexin et de Vigny (R. Soyer, 1953).

Les formations géologiques tertiaires parisiennes n'ont pas ou peu été affectées par des accidents tectoniques cassants. Les quelques failles observées résultent principalement de tassements locaux. Leur rejet n'excède pas un mètre. Leur rareté montre que Paris n'a pas subi de déformations brutales. Les couches se sont modelées lentement sous l'influence d'évènements tectoniques souples associés à des subsidences (en particulier au niveau de la Fosse Saint-Denis).

La zone d'étude sur laquelle porte cette thèse est limitée au Sud par l'Anticlinal de Meudon, au Nord-Est par le Synclinal de la Seine et au Nord-Ouest par la Boucle de Gennevilliers qui correspond à un léger bombement du toit de la Craie de Meudon. Les documents cartographiques que nous présenteront par la suite s'étendront jusqu'à ces limites auxquelles nous donnerons une signification hydrogéologique.

### **1.3. Litho-stratigraphie des formations géologiques**

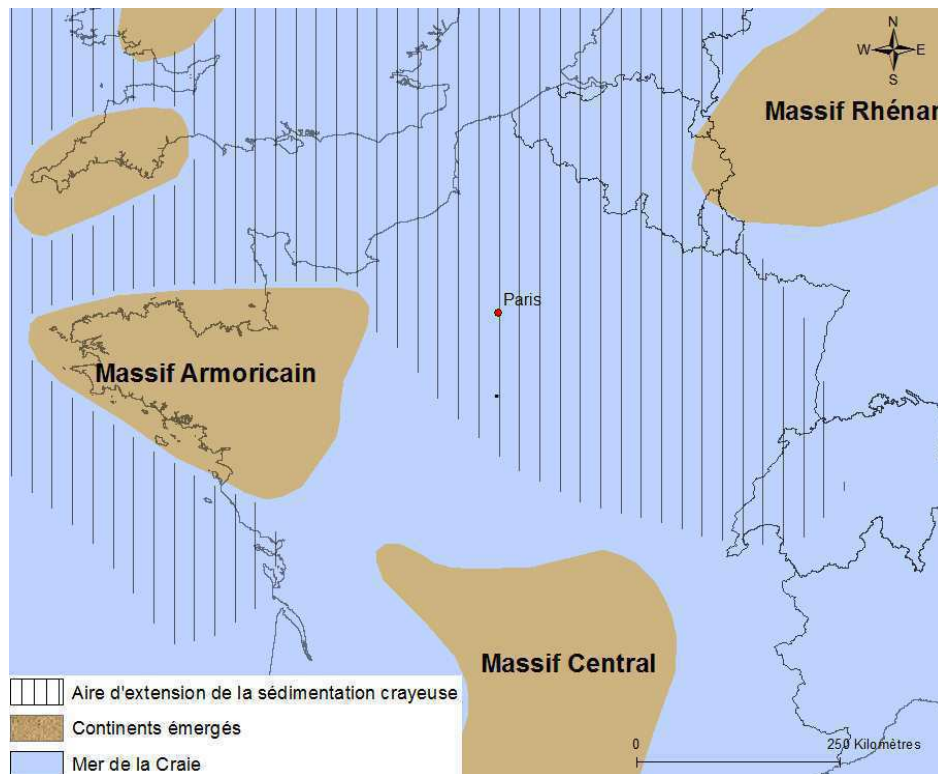
Paris a été parcouru et étudié par une pléiade de chercheurs et de foreuses pour les nombreuses études liées aux aménagements de la capitale. 17 772 sondages furent utilisés afin de décrire les différentes formations géologiques. 5056 sondages sont issus du fichier « *geoparis* » (source BRGM), 4 735 du fichier « *xy sondages* » (source BRGM) et 10 763 proviennent directement des cartes géologiques de l'Inspection Générale des Carrières de Paris (données non renseignées dans les autres fichiers). 1 164 sondages sont identiques entre les fichiers *geoparis* et *xy sondages*, ce qui porte le nombre effectif de sondages à 17 772. Ces données permettent de décrire les différentes formations géologiques parisiennes des plus anciennes aux plus récentes et de les délimiter. Ces formations se développent depuis le Campanien au Stampien supérieur.

#### **1.3.1. Les formations secondaires**

La Craie de Meudon est un calcaire tendre du Campanien qui s'est formé il y a environ 65 millions d'années dans une mer calme et peu profonde sous une hauteur d'eau comprise entre 100 et 200 mètres (Figure 1. 5). Sa partie sommitale a été érodée au Dano-Montien, en particulier au niveau de la Fosse Saint-Denis.

La Craie est constituée d'une boue micritique composée d'éléments calcitiques ou coccolithes microscopiques (entre 0,1 et 10  $\mu\text{m}$ ). Des lits de silex noirs de tailles variables (longueur pouvant dépasser plusieurs centaines de centimètres) soulignent la stratification de cette formation (Annexe 1. 3 et Annexe 1. 4). Elle est très organogène et un certain nombre de fossiles peuvent y être conservés (Annexe 1. 5). Au début du Tertiaire, elle a enregistré quelques accidents tectoniques (Annexe 1. 6).

A Paris, son épaisseur avoisine 300 mètres. Elle vient à l'affleurement au sommet de l'anticlinal de Meudon où elle est recouverte directement par les alluvions



**Figure 1. 5: Schéma paléogéographique du nord-ouest de l'Europe au Crétacé supérieur. Simplifié d'après Ziegler (1982).**

### 1.3.2. Les formations tertiaires

Ces formations, qui pour certaines sont aquifères, composent un vaste ensemble pouvant atteindre 200 mètres d'épaisseur au niveau de la butte Montmartre. Elles comprennent un certain nombre de terrains lithologiquement différents qui ont enregistré au cours du temps l'évolution géomorphologique de Paris.

→ Les Marnes de Meudon

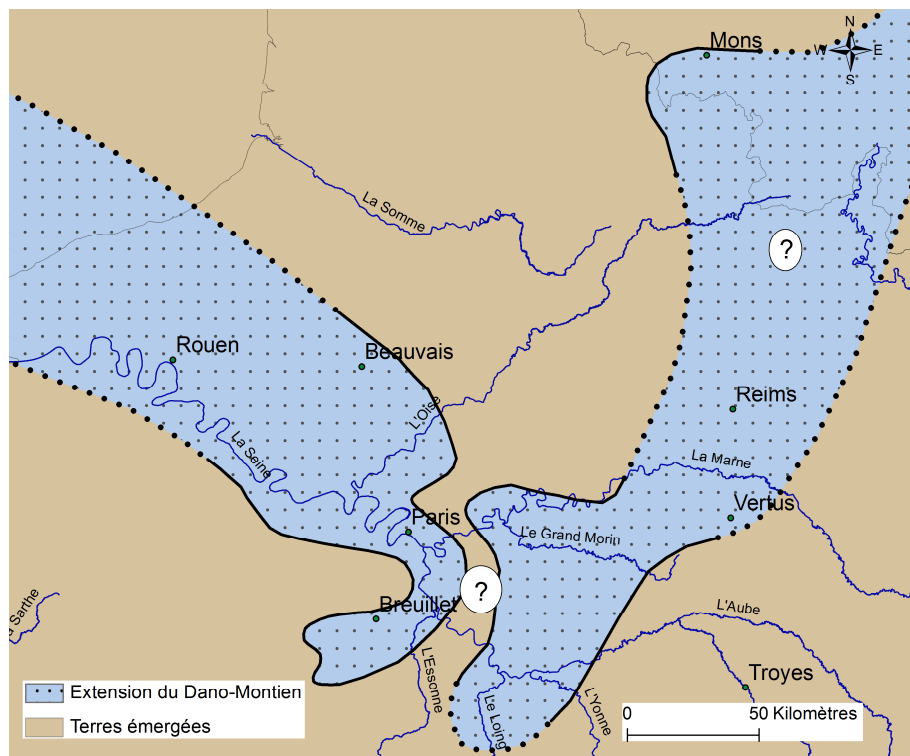
Après la longue émergence et l'érosion intense de la région parisienne au Maestrichtien, des dépôts montins transgressifs ont comblé les dépressions du substratum crayeux. Cette mer était peu profonde (jusqu'à une vingtaine de mètres) et occupait un golfe tranquille (Figure 1. 6). Constitués de marnes et de calcaires, plus ou moins représentés, l'épaisseur de ces dépôts peut dépasser 5 mètres.

Verticalement, on remarque que les calcaires sont plus abondants à la base de la couche (Annexe 1. 7), durs et fossilifères à proximité de l'axe de Meudon. Horizontalement, ils deviennent plus marneux à l'est de Paris. Les Marnes de Meudon présentent des niveaux marins bien constants, mais aussi des couches continentales qui leur confèrent une certaine hétérogénéité (S. Amar et al. 1970).

Cette formation se structure en deux faciès contenant des éléments du Crétacé issus de l'érosion de surface:

- La partie basale des Marnes de Meudon a la particularité d'être composée de petits blocs crayeux englobés dans une matrice d'argile verte. Cette formation est extrêmement hétérogène (Annexe 1. 8).
- Le Calcaire pisolithique (ou calcaire oolithique) s'est déposé sur la partie sommitale de la Craie de Meudon lors d'un retour soudain de la mer. Ce calcaire se caractérise par une épaisseur irrégulière, une présence importante de fossiles (cérithes, baculites...) et une couleur rose pâle.

Ces deux faciès des Marnes de Meudon sont rarement présent simultanément, hormis à Meudon.



**Figure 1. 6: Extension du Dano-Montien dans le Bassin Paris. La communication entre la Champagne et la région parisienne demeure hypothétique. (C. Pomerol & L. Feugueur, 1986)**

#### → L'Argile Plastique

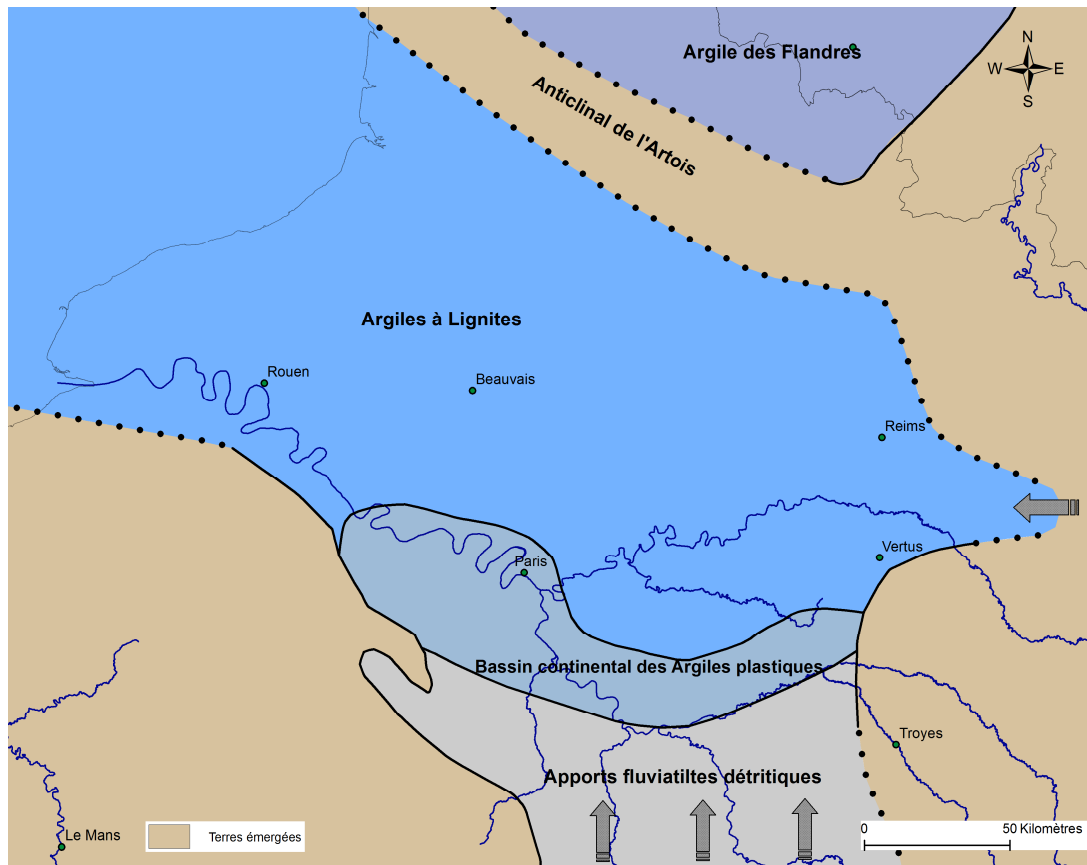
Au début du Thanétien, toute la région parisienne se soulève en provoquant un recul de la mer vers le Nord. Le climat qui était jusque-là subtropical s'adoucit en provoquant d'abondantes précipitations. Il s'ensuit un ruissellement intense accompagné de vastes courants fluviaux en provenance du Nord (Figure 1. 7). La région parisienne s'est alors retrouvée recouverte d'une formation argileuse appelée Argile Plastique.

Cette formation est à sa base composée d'un mélange de lignite, de pyrite et de débris d'os, ou dans des cas plus rares d'argile grise à nodules de calcaire. Juste au-dessus se trouve l'argile

bariolée, aux teintes grises-vertes, « lie de vin » et beiges. Elle est formée de smectites, kaolinite et d'halloysite.

Les Argiles Plastiques ont une épaisseur relativement constante avec une faible perméabilité ( $10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ ). Elles peuvent être fissurées comme au niveau du pont Masséna (S. Amar et al. 1970).

Nous pouvons trouver localement à la base des Argiles Plastiques une formation détritique « appelée le cendrier de Paris » constitué de sables grossiers ligniteux pouvant avoir une épaisseur de 10 mètres (comme dans le 13<sup>e</sup> arrondissement de Paris) qui sont aquifères.



**Figure 1. 7: Extension des principaux faciès du Sparnacien dans le Bassin Parisien. (L. Feugueur, 1986)**

→ Les Sables d'Auteuil

Juste après que l'Argile Plastique se soit mise en place, la mer effectue un timide retour sous la forme d'un système lagunaire sans atteindre l'Anticlinal de Meudon. Il s'ensuit le dépôt, à de très faibles profondeurs (quelques mètres), des Sables d'Auteuil.

Ils correspondent à une formation sédimentaire aquifère composée de sables quartzeux gris grossiers à moyens avec de petits galets calcaires et parfois de niveaux fins argileux et ligniteux. Leur perméabilité comprise entre  $10^{-4}$  et  $10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$  dépend des proportions sables-argiles. Leur épaisseur peut atteindre 10 mètres.



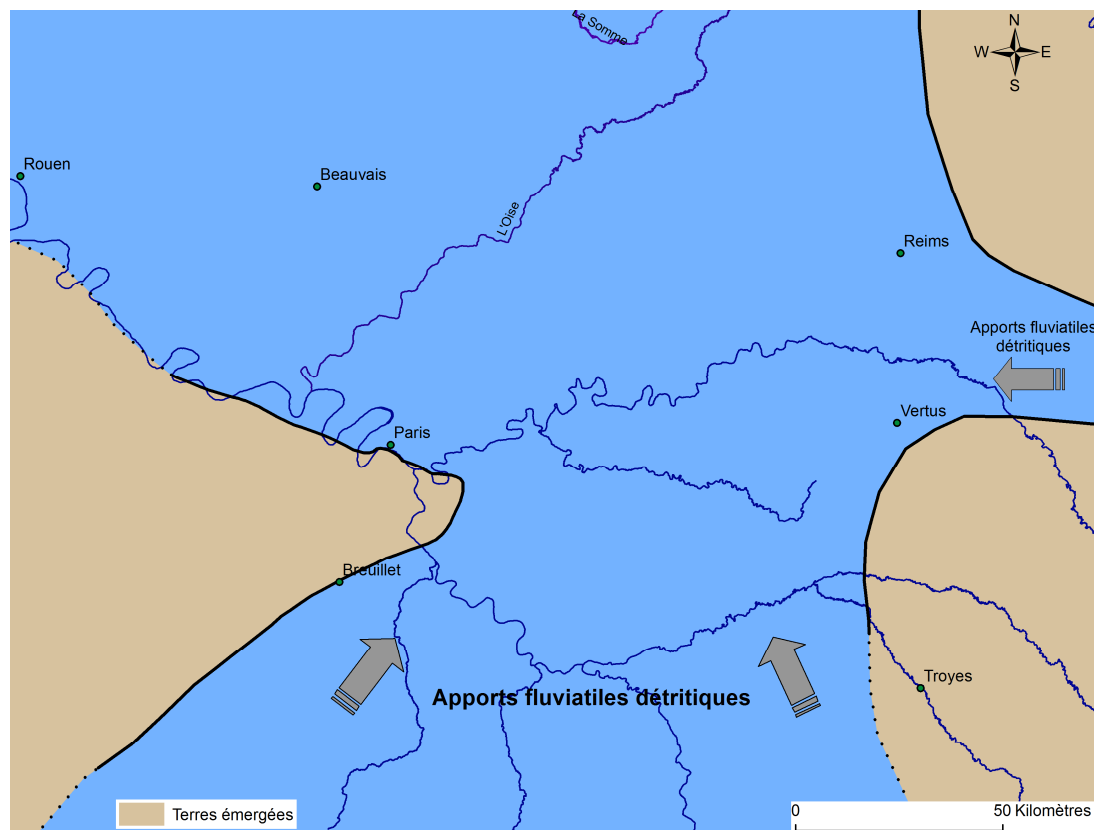
## → Les Fausses Glaises

Les Fausses Glaises se sont déposées sur les Sables d'Auteuil dans un système laguno-marin à une cote proche de 0.

Ils correspondent à un ensemble d'argiles plus ou moins sableuses, grises à brunes, ligniteuses et pyriteuses contenant des bancs sableux vestiges d'anciens rûs. Certains fossiles issus d'un milieu lacustre à saumâtre peuvent être présents. Leurs épaisseurs varient de 2 à 5 m, en fonction de leur localisation, avec un amincissement au niveau de l'anticlinal de Meudon.

## → Les Sables de Cuise et les Sables Supérieurs

A la fin du Sparnacien, la mer en provenance du Nord effectue son retour (Figure 1. 8). Dans un premier temps, des sables d'origine fluviale (Sables Supérieurs) se déposent, suivis d'une couche puissante de sables marins (Sables de Cuise). Ces sables ont sédimenté sous une hauteur d'eau comprise entre 20 et 40 mètres. A Paris, hormis quelques lambeaux isolés, ils n'ont pas dépassé la Seine. L'absence de ces sables en rive gauche résulte d'une surrection de l'Anticlinal de Meudon.



**Figure 1. 8: Extension du Cuisien dans le Bassin de Paris. Ch. Pomerol, L. Feugueur (1986)**

Les Sables Supérieurs (ou Sables du Soissonnais) d'origine fluviale sont composés de sables fins à moyens où des lentilles argileuses/ligniteuses sont intercalées. La limite des Sables Supérieurs (Annexe 1. 9) et des Sables de Cuise n'est pas définie clairement car leur sédimentation s'entrecroise, en particulier entre le boulevard Saint-Germain et la gare Saint-Lazare.

Les Sables de Cuise (Tableau 1. 1), sont fins, propres, quartzeux, glauconieux, bien classés et souvent fossilifères (présence de dents de requins). Localement ils sont mélangés à des sables argileux verdâtres à smectites. Ils sont absents au Sud du Boulevard Saint-Germain, mais peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres dans la Fosse Saint-Denis. Leur épaisseur n'est pas clairement définie sur toute la surface parisienne étant donnée la profondeur importante du toit de la formation qui est à plus de 100 mètres de la surface au niveau de Saint-Denis.

Étage	Sous étage	Formation	Nature	Épaisseur	Paléoenvironnements
Yprésien	Cuisien	Argile de Laon	Argile à smectite dominante avec un peu d'illite	0 à 6 m	Sublittoral, laguno-marín avec des influences fluviales
		Sables de Cuise	Sables glauconieux, micacés, fins et relativement bien classés	0 à 25 m	Marin
	Sparnacien	Sables Supérieurs	Sables non fossilifères, pouvant être gréseux et ligniteux	0 à 25 m	Fluviale
		Fausses Glaises	Argiles ligniteuses à faune saumâtre	2 à 5 m	Laguno-marín
		Sables d'Auteuil	Sables quartzeux	2 à 10 m	Lagunaire
		Argile plastique	Argile bariolée riche en Kaolinite, parfois sableuse	10 à 20 m	Fluviale
		Cendrier	Lentille sableuse localisée dans le 13 <sup>e</sup>	0 à 9 m	
Dano-Montien	Dano-Montien	Marnes de Meudon	Fossilifère, discontinu et riche en invertébrés	1 à 5 m	Fluvio-lacustre marécageux

**Tableau 1. 1: Tableau synthétique des formations yprésiennes**

→ L'Argile de Laon

A la fin du Cuisien, la mer se retire et dépose, sous la forme de lentilles très isolées, l'Argile de Laon. Il semblerait que cette argile ne soit présente qu'au niveau de certaines cuvettes du toit des Sables de Cuise.

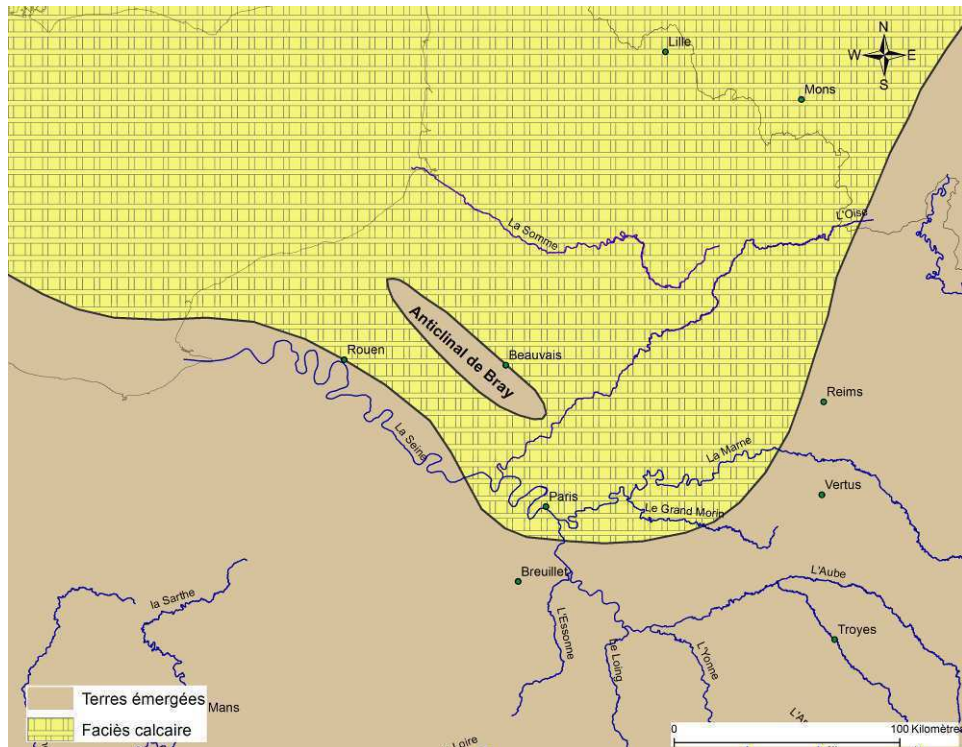
L'Argile de Laon présente une alternance de lits de sable très fin gris clair et d'argile noire ligniteuses riche en matières organiques (racines). Elle peut localement avoir une épaisseur allant jusqu'à 6 mètres comme au niveau du Quai de Jemmapes (Annexe 1. 10).

→ Le Calcaire Grossier

Au début du Lutétien, en provenance de l'Atlantique par la Manche, la mer revient et submerge totalement Paris et sa banlieue (Figure 1. 9). Toutes les formations subjacentes sont alors recouvertes par le Calcaire Grossier très fossilifère. Cette transgression s'est faite progressivement, et tous les étages du Lutétien ne sont pas représentés dans la capitale (J. Gély, 2009).

Le Lutétien, activement exploité à Paris, à l'intérieur de ses limites administratives de l'époque, jusqu'en 1813, fut étudié par bon nombre de géologues et paléontologues (Lavoisier, Cuvier, Lamarck, d'Orbigny...) dès le 19<sup>e</sup> siècle. Sa puissante épaisseur à Paris et ses nombreux affleurements en carrières (Annexe 1. 11) ont permis d'identifier les stratotypes du Lutétien

(Catacombes de Paris et Val-de-Grâce). Toutes ces premières recherches ont participé à la dénomination du Lutétien (*Lutetia* nom gaulois).



**Figure 1. 9: Extension du Lutétien Inférieur (Ch. Pomerol et L. Feuguere, 1986).**

Le Calcaire Grossier est extrêmement bien développé à Paris et son épaisseur peut atteindre 35 mètres. Il présente trois niveaux bien distincts correspondant à des modifications des conditions de dépôt.

- Le Calcaire Grossier Inférieur, s'est déposé durant une franche incursion marine à l'Eocène moyen. Sa base qui repose sur une surface d'érosion, contient des sables grisâtres-verdâtres plus ou moins gréseux et glauconieux, qui ont recristallisé en grès très durs. Ce niveau peut atteindre 3 mètres (Bois de Vincennes). Sa partie supérieure est composée d'un sable calcaire grisâtre glauconieux riche en Nummulites, où quelques Cérithes et bivalves sont présents (Annexe 1. 12).
- Le Calcaire Grossier Moyen est issu de la progression de la transgression marine du Lutétien inférieur. Cette formation détritique se compose, de calcaire massif à *Orbitolites*, *Miliolites* et *Nummulites*. Il est tendre, friable et induré à la base.
- Le Calcaire Supérieur s'est mis en place vers la fin de la transgression marine du Lutétien moyen. La mer était peu profonde (seulement de quelques mètres) et les Cérithes abondaient (Annexe 1. 13) à proximité de grands herbiers. Le rivage était proche ce qui explique la présence de quelques fragments de bois flottés dans ces sédiments (Annexe 1. 14). Ces conditions de dépôts font du Calcaire Grossier Supérieur une formation très organogène (Cérithes, Miliolites ...) organisée en bancs de calcaire fin.

Les calcaires du Lutétien sont donc constitués d'une succession de bancs calcaires de nature diverse (Figure 1. 10). Ils présentent une certaine altération qui décroît en profondeur. Cela implique une variation verticale de la perméabilité au sein de cette formation. Ainsi le Calcaire Supérieur va avoir une perméabilité proche de  $10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$  alors que la valeur des Calcaires Inférieurs va être de  $10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ .

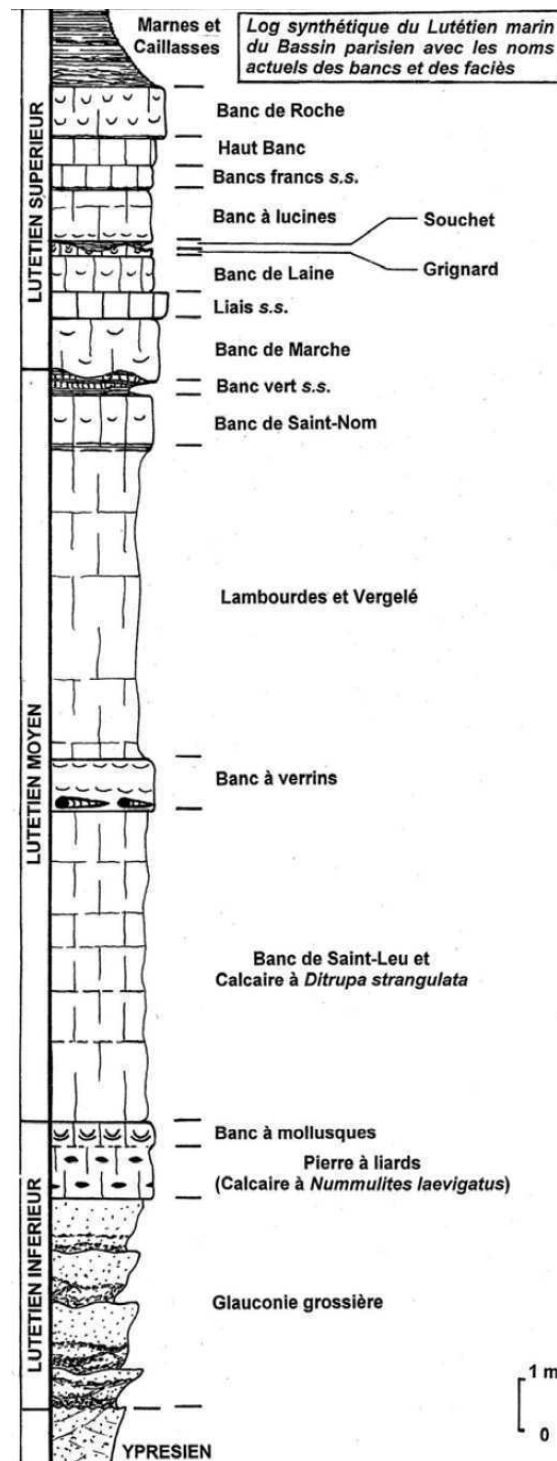


Figure 1. 10: Coupe géologique synthétique du Lutétien dans le Bassin Parisien (J-P Gély, 2009).

## → Les Marnes et Caillasses

Au Lutétien Supérieur, le Bassin Parisien se ferme (Figure 1. 11). Il est alimenté par l'Océan Atlantique, via la Manche, grâce à la gouttière normande (Synclinal du Vexin). Petit à petit le bassin se confine jusqu'à devenir une lagune.

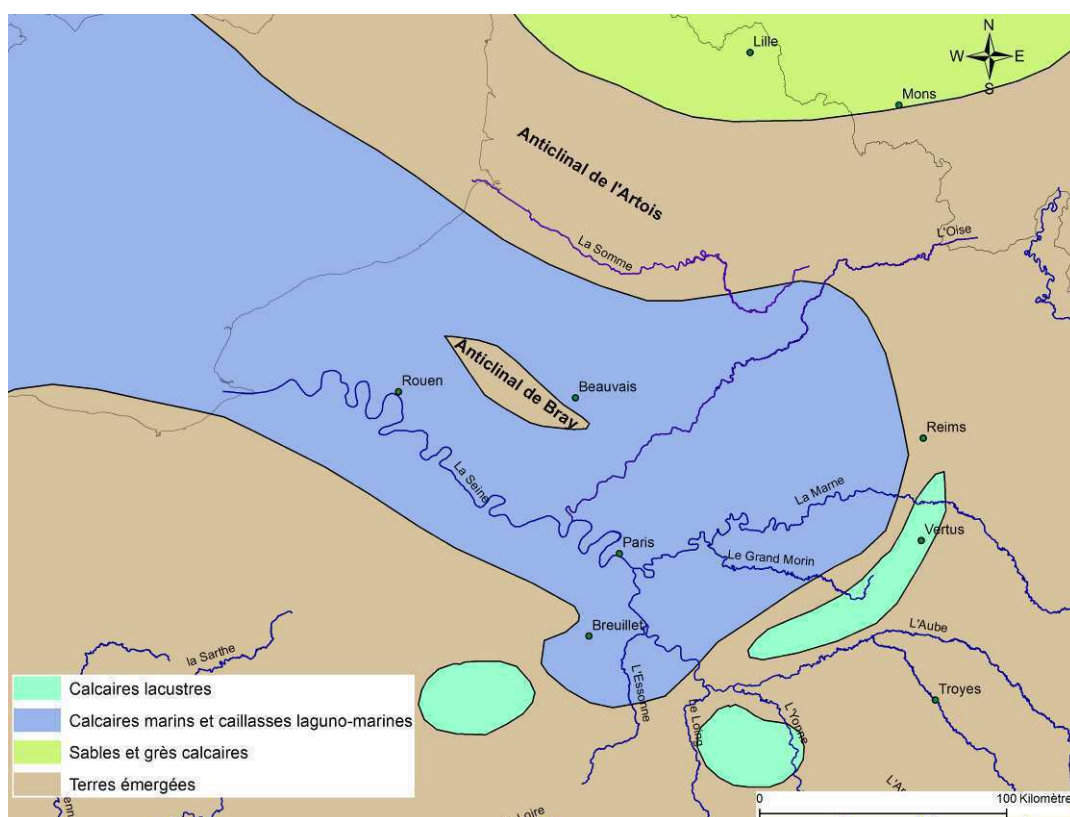
Les Marnes et Caillasses sont une formation très hétérogène (Annexe 1. 15 et Annexe 1. 17) et finement stratifiée, constituée de bancs en alternance de dolomies, d'argiles magnésiennes, de silice et de gypse le tout sur une épaisseur pouvant atteindre parfois 35 mètres à l'Est de Paris. Au niveau de l'Anticlinal de Meudon, les Marnes et Caillasses s'amenuisent et le gypse est absent ou présent seulement sous la forme de petits bancs altérés.

Selon Arnoult, Le Guillout (1967), Toulemont (1970) et Mariotti (1979), la présence de lentilles gypseuses est en étroite relation avec l'épaisseur des Marnes et Caillasses (Tableau 1. 2).

Epaisseur des Marnes et Caillasses	Epaisseur du Gypse
0 à 12 mètres	nulle
12 à 20 mètres	5 à 20% de l'épaisseur totale
Supérieure à 20 mètres	Supérieure à 10%

**Tableau 1. 2 : Relations entre l'épaisseur des Marnes et Caillasses et le gypse s'y trouvant**

Les Marnes et Caillasses, présentent des valeurs de perméabilité très variables comprises entre de  $8.10^{-6}$  m.s<sup>-1</sup> en zones non gypseuses (Diffre, 1969) et de  $5.10^{-3}$  m.s<sup>-1</sup> en zones gypseuses (Nord de Paris).



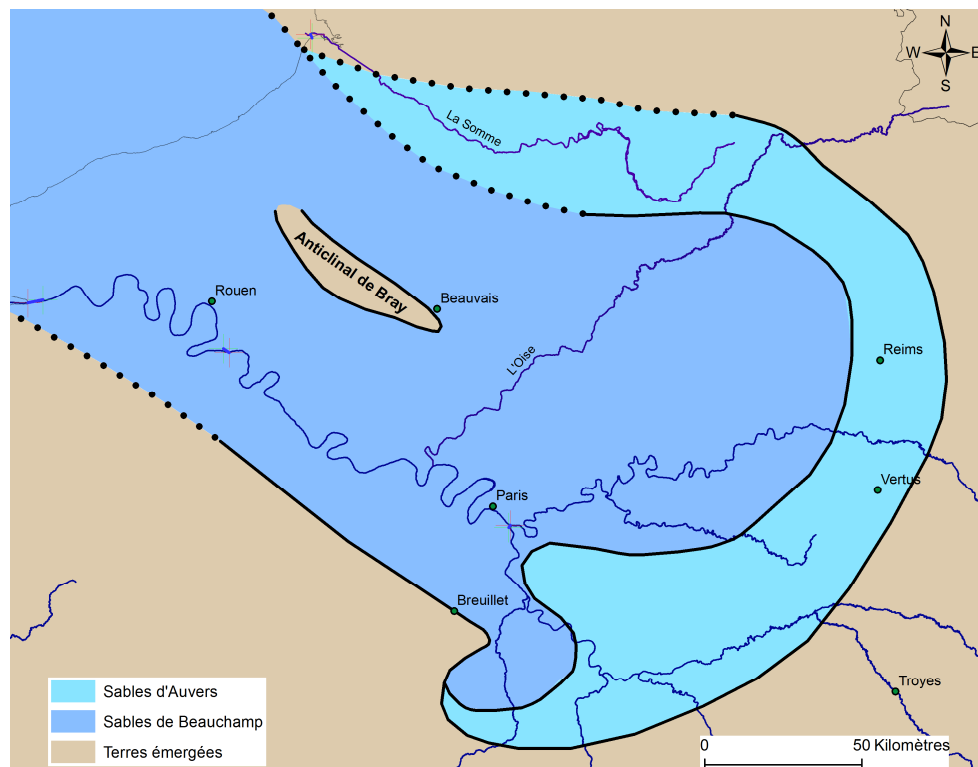
**Figure 1. 11: Extension du Lutétien Supérieur (Ch. Pomerol et L. Feugueur, 1986).**

→ Les Sables de Beauchamp

Au cours de l'Auver sien, la mer transgresse temporairement sur la surface d'érosion des Marnes et Caillasses (Figure 1. 12).

Cette transgression permettra la formation d'un faciès épicontinental détritique, nommé Sables de Beauchamp, d'une épaisseur pouvant être supérieure à 20 mètres. Ils se présentent, à leur base, sous forme de sables fins et argileux ayant une couleur bleue-verte ou « gris sale », alors qu'au sommet, des gravelles calcaires biens calibrées sont présentes. Au centre se trouve un banc grésio-argileux d'épaisseur variable, peu perméable pouvant être remplacé par du gypse

Le Calcaire de Ducy, composé d'argiles, de calcaires et de marnes recouvre les Sables de Beauchamp sur une épaisseur comprise entre 50 cm et 2 m. Il peut présenter une fraction gypseuse.

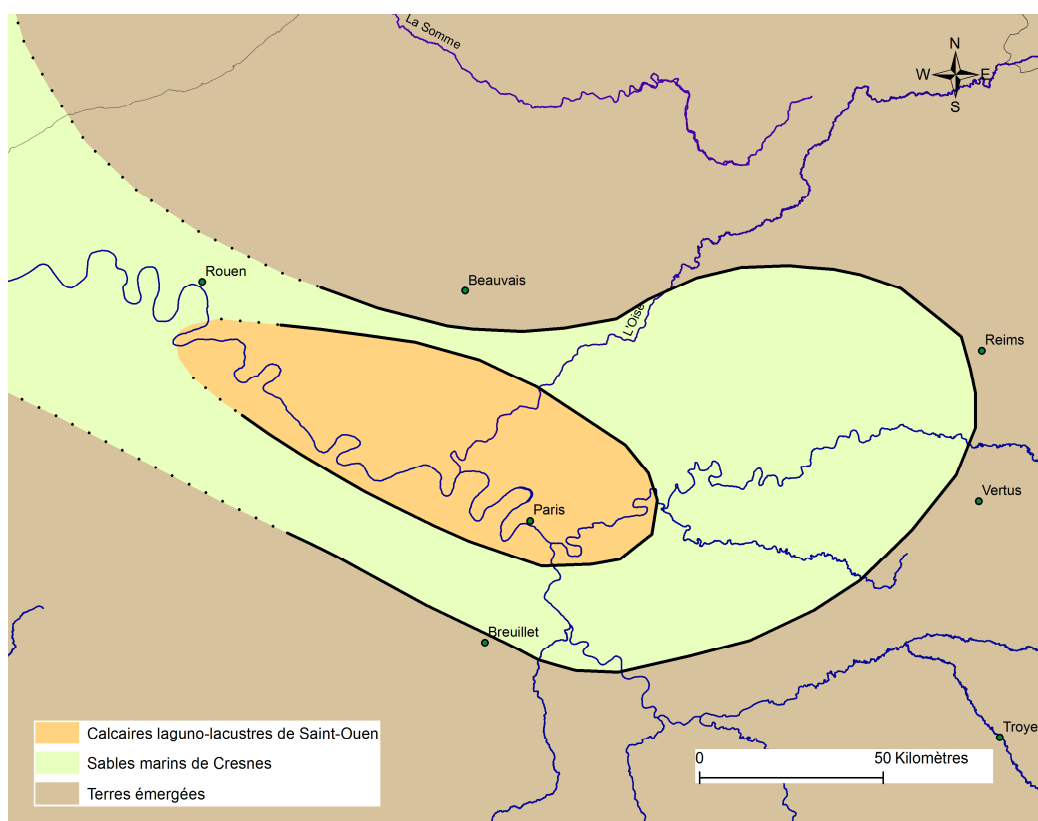


**Figure 1. 12: Extension de l'Auver sien dans le Bassin Parisien (Ch. Pomerol, 1995)**

→ Le Calcaire de Saint-Ouen

Durant le Marinésien, les apports provenant de la Manche s'amenuisent en laissant place à des dépôts laguno-lacustres de grande hétérogénéité correspondant au Marno-calcaire de Saint-Ouen (Figure 1. 13).

Puissante de 7 à 25 mètres, cette formation variant rapidement d'un sondage à l'autre, est constituée de deux faciès marno-calcaires et de quelques lentilles sableuses qui favorisent les circulations d'eau. La partie inférieure est calcaire et renferme des bancs sublithographiques d'argile magnésienne et de sépiolite. Quant à la partie supérieure, des faciès marneux (surtout des marnes blanches grumeleuses à silex et rognons de calcaire) y prédominent.



**Figure 1. 13: Extension des sables marins de Cresnes et des calcaires laguno-lacustres de Saint-Ouen (Ch. Pomerol, 1995)**

Les variations latérales de faciès sont très nombreuses (Annexe 1. 16). Des lentilles de gypse sont présentes et dépendent de l'épaisseur du Calcaire de Saint-Ouen (Tableau 1. 3).

Epaisseur du Calcaire de Saint-Ouen	Epaisseur des lentilles de gypse
0 à 10 mètres	nulle
10 et 12 mètres	Environ 0,5 mètres
Supérieure à 12 mètres	Plus de 50% de l'épaisseur du Calcaire de Saint-Ouen

**Tableau 1. 3: Relations entre l'épaisseur du Calcaire de Saint-Ouen et le gypse s'y trouvant.**

Le toit du Calcaire de Saint-Ouen présente des ondulations de plus ou moins grandes amplitudes. Cette organisation, résulte à la fois de tassements différentiels dus à la nature hétérogène du faciès (les ondulations sont plus importantes si le faciès est marneux) mais également à des dissolutions de gypse (puis recristallisation sous forme de gypse pseudomorphosé) résultant d'abaissements piézométriques anciens (L.C.P.C. 1969). Cette formation repose sur un niveau fin, discontinu, marneux et souligné de débris fins coquillers dit Horizon de Mortefontaine de faible épaisseur (env.50cm).



→ Les Sables verts Infragypseux ou Sables de Monceaux

Les Sables Verts ou Sables Infragypseux marquent la fin du Bartonien avec le retour d'un régime laguno-marin. Ils comblent les vides présents à la surface du Calcaire de Saint-Ouen. Le sable fin vert plus ou moins pulvérulent qui les constitue est bien calibré, cohérent à la base et propre en tête. Quelques bancs de gypse peuvent s'y trouver (Nord de Paris) tout comme des bancs de marnes molles compactes. L'épaisseur moyenne des Sables Verts est de l'ordre de 1 à 2 mètres à Paris.

→ Les Marnes Infragypseuses

Elles correspondent à un vaste dépôt laguno-marin de faible épaisseur (entre 1,5 et 2 mètres) constitué de marnes à Paludines (gastéropodes) et de la quatrième Masse de gypse saccharoïde bartonien. Les Marnes Infragypseuses, de type marno-dolomitique, sont associées aux Masses et Marnes du Gypse lorsqu'elles ont été fortement altérées donc difficiles à différencier.

→ Les Masses et Marnes du gypse Ludien

Au Bartonien supérieur (Ludien), la mer revient en Île-de-France et dépose les Marnes à Pholadomyes. Elle était alors peu profonde, mais s'étendait loin vers le Sud et l'Est. Par la suite la mer se retira et laissa place à un vaste ensemble laguno-lacustre pendant une longue période (Figure 1. 14). Les communications avec le domaine marin furent fortement restreintes ce qui favorisa le confinement de cette vaste lagune.

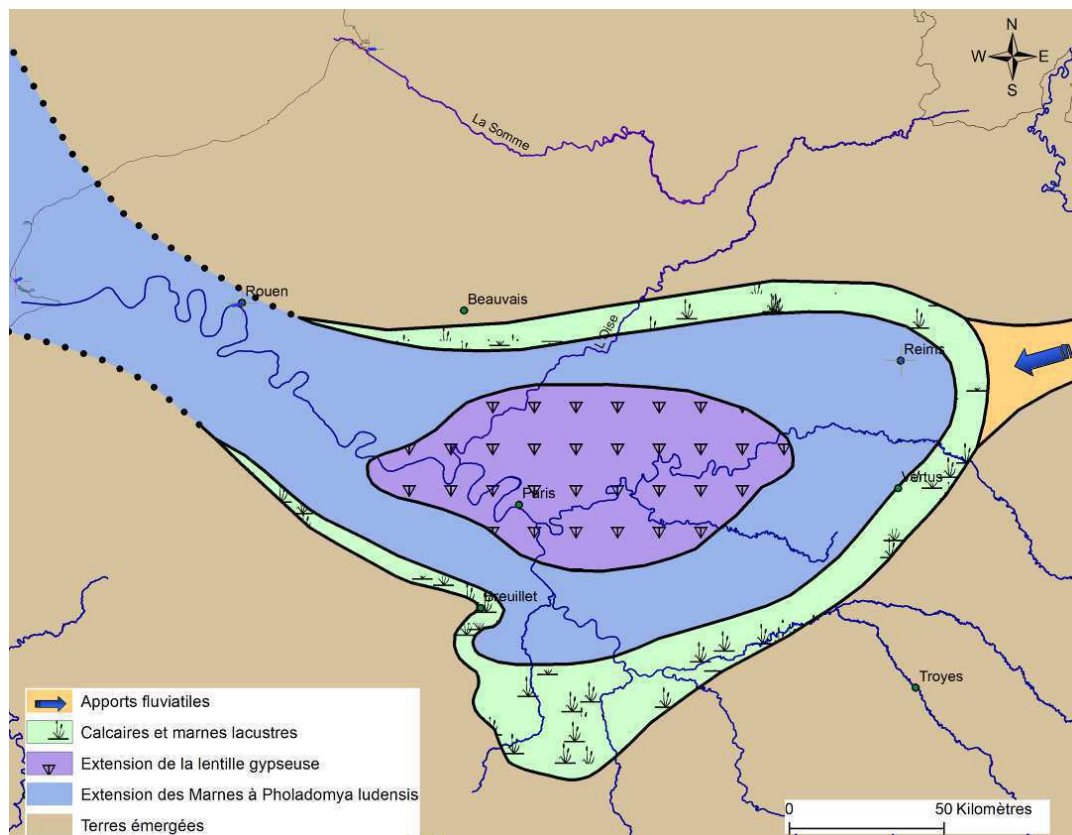


Figure 1. 14 : Extension du Ludien dans le Bassin de Paris (Ch. Pomerol, 1995)



Cet ensemble, formé dans un milieu lagunaire, qui s'est progressivement isolé du domaine marin, est composé de trois masses gypseuses et de trois couches marneuses appelées Masses et Marnes du Gypse (Tableau 1. 4).

Les masses de gypse sont composées de bancs de gypse saccharoïde (Annexe 1. 18) exploités jusqu'au milieu du 20<sup>e</sup> siècle. Les gypses de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> Masses sont recoupés par des niveaux de gypse maclé (macles simples) en « pieds d'alouette » (Annexe 1. 19). La 1<sup>e</sup> Masse (Annexe 1. 20) est formée principalement de bancs massifs de gypse saccharoïde. Quant aux marnes, elles sont composées d'alternances de marnes marbrées magnésiennes grises et de marnes blanchâtres séparées par des lits d'argiles. Les Marnes à fers de lance contiennent de nombreux cristaux de gypse maclé de tailles variables (Annexe 1. 21 et Annexe 1. 22).

Étage	Sous-étage	Formations	Épaisseur
Bartonien	Ludien	Marnes supragypseuses	
		Gypse de 1 <sup>ère</sup> Masse	15 à 25 m
		Marnes à fers de lance gypseuses	4 à 8 m
		Gypse de 2 <sup>e</sup> Masse	4 à 8 m
		Marnes à Lucines	2 à 5 m
		Gypse de 3 <sup>e</sup> Masse	2 à 4 m
		Marnes à Pholadomies	1 à 2 m
	Marinésien	Gypse de 4 <sup>ème</sup> Masse	1,5 m
		Marnes Infragypseuses	

Masses et Marnes du Gypse

**Tableau 1. 4: Synthèse de la formation des Masses et Marnes du Gypse**

La puissance des dépôts de gypse saccharoïde décroît en fonction de leur âge. Les dépôts anciens, sont plus minces que les récents. Il semblerait que l'épaississement des formations soit en relation avec la croissance de l'évaporation de la lagune. Jusqu'à présent aucune corrélation entre la structure du bassin et la puissance des formations n'a été trouvée. Il se pourrait que l'épaississement puisse être mis en relation avec l'élévation de la bordure est du Bassin Parisien.

Le gypse ( $\text{Ca,SO}_4\text{2H}_2\text{O}$ ), appelé vulgairement pierre à plâtre, est extrêmement soluble et possède une faible perméabilité. De plus, les bancs de gypse sains sont très souvent fissurés. De ce fait les Masses et Marnes du Gypse se trouvent généralement à la base des buttes témoins, protégées par les Marnes supragypseuses. En périphérie de ces zones, elles subissent une forte altération rendant difficile la distinction entre les différents composants lithologiques.

#### → Les Marnes Supragypseuses

A la fin du Ludien, le climat se refroidit. Il s'ensuit un épisode lacustre non évaporitique au cours duquel se déposent les Marnes Supragypseuses. Elles sont constituées de marnes (l'illite et la montmorillonite dominant) et de quelques bancs de gypse.

Les Marnes supragypseuses se décomposent en deux niveaux bien distincts :

- A leur base se trouve sur une épaisseur de 10 mètres : les Marnes Bleues d'Argenteuil. Elles sont formées de trois bancs de gypse saccharoïde intercalés entre des argiles plastiques.
- Les Marnes Blanches de Pantin constituent sur 3 à 5 mètres le sommet des Marnes supragypseuses. Ce sont des marno-calcaires continentaux dont la partie sommitale est composée d'un banc de gypse saccharoïde.

→ Les Formations de l'Oligocène

A Paris très peu de formations oligocènes ont résisté à l'érosion. Seules les buttes de Montmartre et de Belleville en sont les témoins. Elles laissent apparaître, de bas en haut les Marnes à Cyrènes, les Glaises Vertes, le Travertin de Brie (ou Calcaire de Brie), les Marnes à Huîtres et les Sables de Fontainebleau.

Au début de l'Oligocène, la mer revient, recouvre sur de faibles hauteurs d'eau un sol ludien fortement érodé et dépose les Marnes à Cyrènes. Ce sont des argiles brunâtres finement feuilletées où s'intercalent de petits lits sableux. De nombreuses empreintes de mollusques fousseurs sont présentes.

La sédimentation devient plus régulière et les Glaises Vertes se déposent. Elles se composent à leur base d'un petit banc gypso-marneux dit gypse Marabet (identifié sous le Sacré-Cœur sur la Butte Montmartre) surmonté d'argile jaunâtre. Le reste des Glaises Vertes présente une alternance d'argiles blanches et vertes avec quelques débris organiques au centre.

Une courte régression se produit et des dépôts lacustres appelés Travertin de Brie sédimentent. Ils sont constitués à Paris de calcaire sablo-argileux jaune où s'intercalent quelques bancs de marnes (vertes, jaunes ou bleues) et de graviers.

Au début du Stampien (Figure 1. 15), la mer revient et dépasse largement Paris vers le Sud et le Sud-est. Les Marnes à Huîtres sont le fruit de cette transgression. Elles forment une couche plus ou moins continue de couleurs variées (jaunâtres, grises vertes, beiges, rousses à bleutées, blanchâtres et kakis). Elles sont composées de marnes sableuses, plastiques, compactes et cohérentes avec quelques nodules calcaires cristallins. De nombreuses *Ostrea cyathula* (diamètres compris entre 6,5 et 6,8 cm) sont présentes.

Au sommet du Stampien (et des buttes témoins), se trouve les sables marins de Fontainebleau (Annexe 1. 23) appelés anciennement « sable à lapins ». Ils se sont déposés à de faibles profondeurs (environ 25 mètres) dans des eaux ayant une température comprise entre 18 et 20°C. Ils sont fins, hétérogènes (présence de blocs gréseux) et présentent quelques différenciations de couleurs (sable jaune rouille, ocre à gris, jaune clair, vert, jaune gris et blanc) dues aux oxydes de fer (circulation des eaux). Les autres formations Oligocènes n'ont pas atteint Paris, où furent totalement érodées comme l'Argile à Meulière de Montmorency.

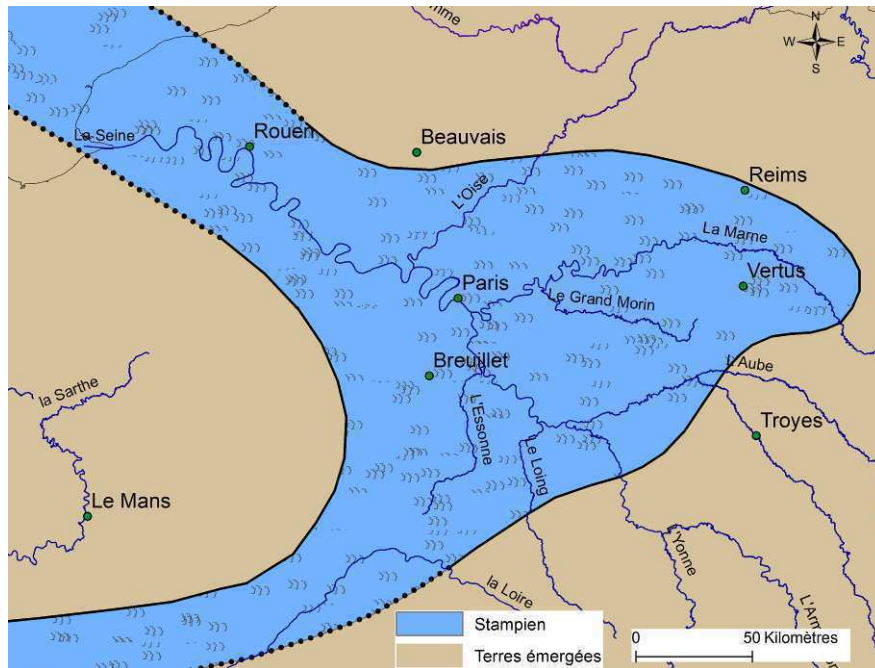


Figure 1. 15: Extension du Stampien dans le Bassin Parisien (Ch. Pomerol, 1995)

### 1.3.3. Les formations superficielles

Au cours du Quaternaire, les formations géologiques dites affleurantes se sont vues complètement recouvertes par des formations d'origine glaciaire / interglaciaire et plus particulièrement par des formations anthropiques de Paris. Ces « nouvelles » formations sont dites superficielles et elles peuvent être distinguées en cinq types.

→ Les alluvions anciennes

Ces alluvions pléistocènes tapissent entièrement le lit de la Seine. Elles sont constituées d'éléments très hétérogènes, à la granulométrie variable, ce qui leur confère une bonne perméabilité ( $5 \cdot 10^{-4}$  à  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ). Ses constituants principaux sont :

- graviers marneux
- galets
- rognons de silex (pouvant être noirs)
- silex roulés et anguleux (jusqu'à 10 cm)
- sable limoneux argileux
- sable fin à très grossier de couleurs variables (jaune, gris, beige, jaune-vert, gris-bleuté, ocre, jaune-rougeâtre, roux, vert-gris, brun-rougeâtre, marron clair, rouille, jaune verdâtre)
- blocs calcaire ou siliceux
- cailloux roulés de meulière ou de calcaire (taille variable 1 à 5 cm)
- rognons gréseux roulés
- blocs de calcaire silicifiés (jusqu'à 20 cm)

- sable limoneux et graveleux
- sable alluvionnaire avec coquillages
- sable quartzeux
- niveaux très fin d'argile noire
- traces de lignites et de bois
- silex branchus (20 à 30 cm)
- limons tourbeux
- présence de quelques petits éléments granitiques roulés
- poteries, ossements ...

### → Les alluvions modernes

Durant l'Holocène, la Seine a remblayé la vallée creusée, à la fin de la dernière glaciation du Würm (il y a environ 10 000 ans) par des alluvions modernes constituées de limons, d'argile brune ou grise-verte, de sable, de granules de calcaire et de bancs de tourbe. Cette formation d'une épaisseur variable (entre 1 et 10 mètres), possède une faible perméabilité comprise entre  $10^{-7}$  et  $10^{-9}$  m.s<sup>-1</sup>.

### → Les éboulis ou formations de pentes

Les éboulis (Annexe 1. 24) se trouvent en périphérie des buttes témoins (18<sup>e</sup>, 19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> arrondissements et en bordure des vallées de la Seine et de la Bièvre). Ils résultent d'un glissement des couches géologiques en place de l'Oligocène et de l'Eocène supérieur (Travertins de Brie, aux Glaises Vertes, au Sable de Fontainebleau et au gypse). Ils se présentent sous forme de masses de marnes gypseuses contenant du gypse saccharoïde, de sables (roux, jaunes, blanchâtres, beiges, verdâtres, marrons) avec des graviers, de marnes beiges sableuses, de calcaire gréseux jaunâtre, d'argiles ocre... Les éboulis peuvent atteindre des épaisseurs supérieures à 3 mètres et favorisent les circulations d'eau en subsurface.

### → Les limons des plateaux et les loess

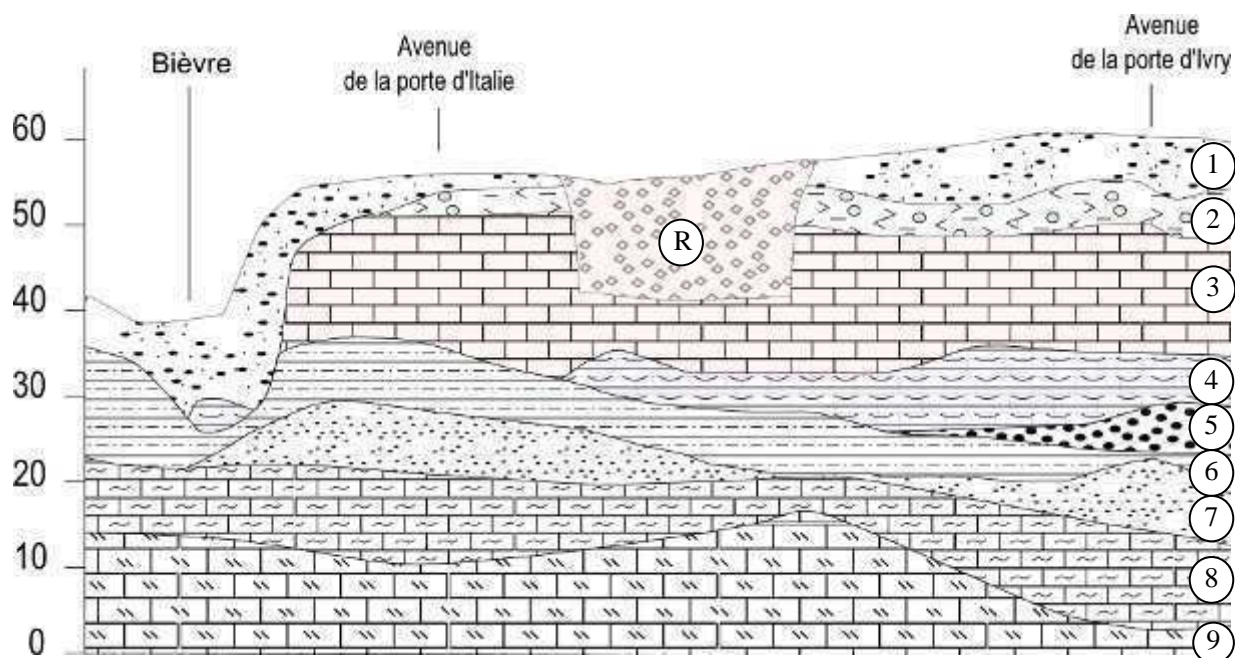
Cette formation géologique très fertile, issue de la dernière glaciation et du transport éolien, est composée de dépôts fins argileux et de sables quartzeux. Ils sont beiges à la base avec des rognons blanchâtres de calcaire et brun-noirâtres avec des poches marneuses au sommet. Au centre, leurs couleurs peuvent être très variées en passant du brun-rougeâtre au gris-bleuté. Leur étendue géographique est fortement limitée car les limons des plateaux et les loess se sont déposés sur les hauteurs parisiennes. Aujourd'hui ils subsistent uniquement sur les buttes témoins et les plateaux, notamment au sud de Paris (porte d'Italie sur une épaisseur de 3 mètres) et particulièrement dans la banlieue (Hauts-de-Seine, Val-de-Marne).

## → Les remblais

Les remblais ou anthroposols (Annexe 1. 25) recouvrent la majorité du sol parisien et peuvent atteindre des épaisseurs étonnantes (certaines zones d'anciennes carrières de gypse à l'ouest de la Butte Montmartre dans le 18<sup>e</sup> arrondissement possèdent jusqu'à 43 mètres de remblais). Ils sont bien souvent de natures diverses (blocs de bétons, graviers, galets, calcaire, sables, marnes, briques, limons, plâtre, mâchefers, morceaux de fer, gypse, maçonneries, mortiers de chaux, bois, tuiles, vase, débris charbonneux, silex, détritiques ou « Poubellien » aux abords des premières enceintes de la ville notamment sous la butte Bonne Nouvelle...) et possèdent une épaisseur hétérogène. Cette formation est sujette à des tassements et à des phénomènes de suffosion en cas de circulation d'eau comme des fuites de canalisations. Ils peuvent localement contenir de petits aquifères perchés.

1.3.4. Synthèse générale

Les différentes formations géologiques tertiaires (Figure 1. 17) à Paris semblent à première vue avoir une organisation relativement simple. Dans le détail, cela est bien plus complexe. Toute la région parisienne a subi à de nombreuses reprises des régressions et des transgressions marines associées à une tectonique bien présente. Toutes ces activités ont façonné la disposition de nombreuses couches qui se croisent et s'entrecroisent. Certaines zones reflètent très bien les particularités de la géologie parisienne. Par exemple la coupe du 13<sup>e</sup> arrondissement parisien (Figure 1. 16 et Annexe 1. 26) montre des formations sédimentaires (Fausses Glaises et Sables d'Auteuil) qui viennent mourir au niveau d'un paléorivage.



*R: Remblais - 1: alluvions anciennes - 2: Marnes et Caillasses - 3: Calcaire Grossier - 4: Fausses Glaises - 5: Sables d'Auteuil - 6: Argile Plastique - 7: Cendrier - 8: Marnes de Meudon - 9: Craie de Meudon.*

**Figure 1. 16: Coupe WSW-ENE du 13<sup>e</sup> arrondissement parisien.**

Pour conclure, la carte géologique (Figure 1. 18) réalisée grâce à 17 772 sondages exploités, nous montre l'organisation latérale des formations géologiques qui ont été recoupées par la Seine. Les plages de couleurs utilisées correspondent aux couleurs de l'IGC.

Nombre d'années	Ere	Période	Etage	Sous-Etage	Symbole	Formation géologique	paléoenvironnements	épaisseur			
22 Ma	IV	Holocène			R	Remblais		jusqu'à 30 m			
					TV	Terre Végétale					
					Gps	Gypse pseudomorphose					
					Am	Alluvions moderne	fluviatile		0 à 10 m		
		Pléistocène			E	éboulis		0 à 15 m			
					LP	Limon des plateaux	éolien	0 à 3 m			
					Aa	Alluvions anciennes	fluviatile	0 à 25 m			
35 Ma	III	Miocène	Aquitanien		MB	Meulière de Beauce					
		Oligocène	Stampien LS	Stampien SS	SF	Sables de Fontainebleau	marin	0 à 18 m			
					MH	Marnes à Huîtres	marin	2 à 4,5 m			
				Sannoisien	TB	Travertins de Bries	lacustres	3 à 8 m			
					GV	Glaises Vertes	sublittoral	6 à 8 m			
					MC	Marnes à Cyrènes	lagunaire				
					Eocène	Barthonien LS	Ludien	MSG	Marnes Supra-Gypseuses	laguno-lacustre	12 à 16 m
		G1	Gypse de 1ère masse	laguno-lacustre				15 à 25 m			
		MFL	Marnes à Fers de Lance	lagunaire semi-aride, aride				4 à 8 m			
		G2	Gypse de 2ème masse	laguno-lacustre				4 à 8 m			
		ML	Marnes à Lucines	laguno-lacustre				2 à 5 m			
		G3	Gypse de 3ème masse	laguno-lacustre				2 à 4 m			
		MPH	Marnes à Pholadomyes	marin				1 à 2 m			
		Marinésien	G4	Gypse de 4ème masse			laguno-marin	env. 1,5 m			
			MIG	Marnes Infra-Gypseuse			marin	1,5 m à 2 m			
			SV	Sables Verts infra-gypseux			laguno-lacustre	0 à 2 m			
			SO	Calcaire de Saint-Ouen			laguno-lacustre	7 à 25 m			
		Lutétien	Auversien	SB		Sables de Beauchamp	laguno-lacustre	10 à 12 m			
						Grès de Beauchamp	laguno-lacustre	0 à 1 m			
						Sables de Beauchamp	laguno-lacustre	10 à 12 m			
			Lut. Sup.	M et C		Marnes et Caillasses	laguno-continental	15 à 35 m			
						Calcaire Grossier					
						CG Supérieur	laguno-marin	7 à 10 m			
						CG Moyen	marin	env. 8 m			
			Lut. Moy.	CG		CG Inférieur	marin	env. 8 m			
						Yprésien	Cuisien	AL	Argile de Laon	laguno marin, sublittoral	0 à 6 m
								SS	Sables de Cuise	marin	0 à 25 m
			Sable Supérieurs (ou Soissonnais)	fluviatile							
			Sparnacien	FG			Fausses Glaises	laguno marin	2 à 5 m		
				SA			Sables d'Auteuil	lagunaire	2 à 10 m		
			55 Ma						AP	Argile Plastique	fluvio lacustre marécageux
65 Ma	Paléocène	Dano-Montien			MM				Marnes de Meudon	fluvio lacustre marécageux	1 à 5 m
			Calcaire pisolitique	marin							
	II	Crétacé Sup.	Sénonien Sup.	Campanien	CB	Craie Blanche de Meudon	marin	300 m			

Figure 1. 17: Tableau synthétique des formations géologiques parisiennes.



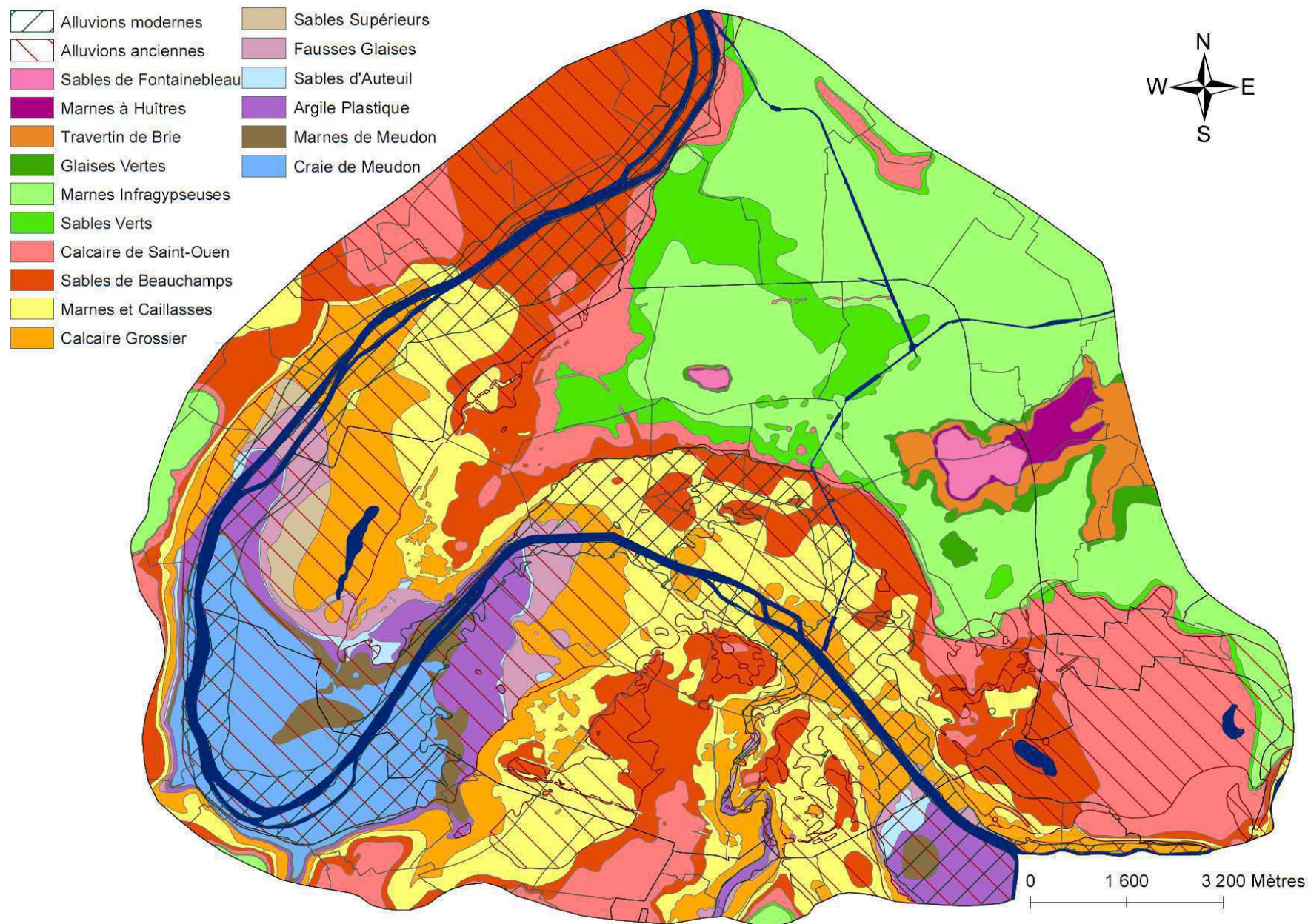


Figure 1. 18: Carte d'écorché géologique de Paris et de sa proche banlieue réalisée grâce à 17 772 sondages géologiques.

## 2. Hydrogéologie

La nature hétérogène des formations géologiques parisiennes rend son hydrogéologie complexe.

### 2.1. Aquifères parisiens

A Paris, seules deux formations géologiques sont très peu perméables (l'Argile Plastique et les Glaises Vertes) alors que presque toutes les autres sont considérées comme des unités aquifères. « L'aquifère parisien », relaté dans de nombreuses littératures (Diffre, 1969 ; Prunier-Leparmentier, 1988), est donc un aquifère multicouche composé de cinq nappes principales (nappe du Bartonien, du Lutétien, de l'Yprésien supérieur, de l'Yprésien inférieur et de la Craie), recoupées par la nappe des alluvions anciennes (Tableau 1. 5). Cet ensemble est surmonté par deux nappes perchées (nappe des Sables de Fontainebleau et nappe du Travertin de Brie) présentes sur les buttes témoins (Butte de Montmartre et Butte de Belleville).

Certaines formations aquifères ont des niveaux piézométriques bien distincts avec localement des niveaux confondus. Cela exprime toute la complexité de ce système multicouche.

Formations aquifères	Formations géologiques
Remblais	Aquifères perchés locaux
NAPPE DES ALLUVIONS	Alluvions anciennes
NAPPES DES SABLES DE FONTAINEBLEAU	Sables de Fontainebleau
NAPPE DU TRAVERTIN DE BRIE	Travertin de Brie
NAPPE DU BARTONIEN (EOCENE SUPERIEUR)	Sables Verts Calcaire de Saint-Ouen Sables de Beauchamp supérieurs
NAPPE DU LUTETIEN	Sables de Beauchamp inférieurs Marnes et Caillasses Calcaire grossier
NAPPE DE L'YPRÉSIEN SUPÉRIEURE	Sables Supérieurs Sables de Cuise
NAPPE DE L'YPRÉSIEN INFÉRIEUR	Sables d'Auteuil
NAPPE DE LA CRAIE	Craie Blanche de Meudon

Tableau 1. 5: Synthèse des formations aquifères parisiennes du Tertiaire et de la Craie.

#### 2.1.1. Caractéristiques hydrogéologiques des formations

Les unités hydrogéologiques parisiennes se distinguent grâce à leur perméabilité.

La Figure 1. 19 nous donne les valeurs médianes de perméabilité des formations associées aux différentes nappes. Ce document a été réalisé grâce à 640 essais de pompages provenant de la RATP et 7 essais de pompages de la Ville de Paris (Annexe 1. 27). La grande majorité des mesures de perméabilité utilisées a été effectuée sur le tracé des métros et des RER (avant le chantier), ce qui explique leur répartition géographique. Pour la Ville de Paris elles proviennent de chantiers liés à des ouvrages d'art.



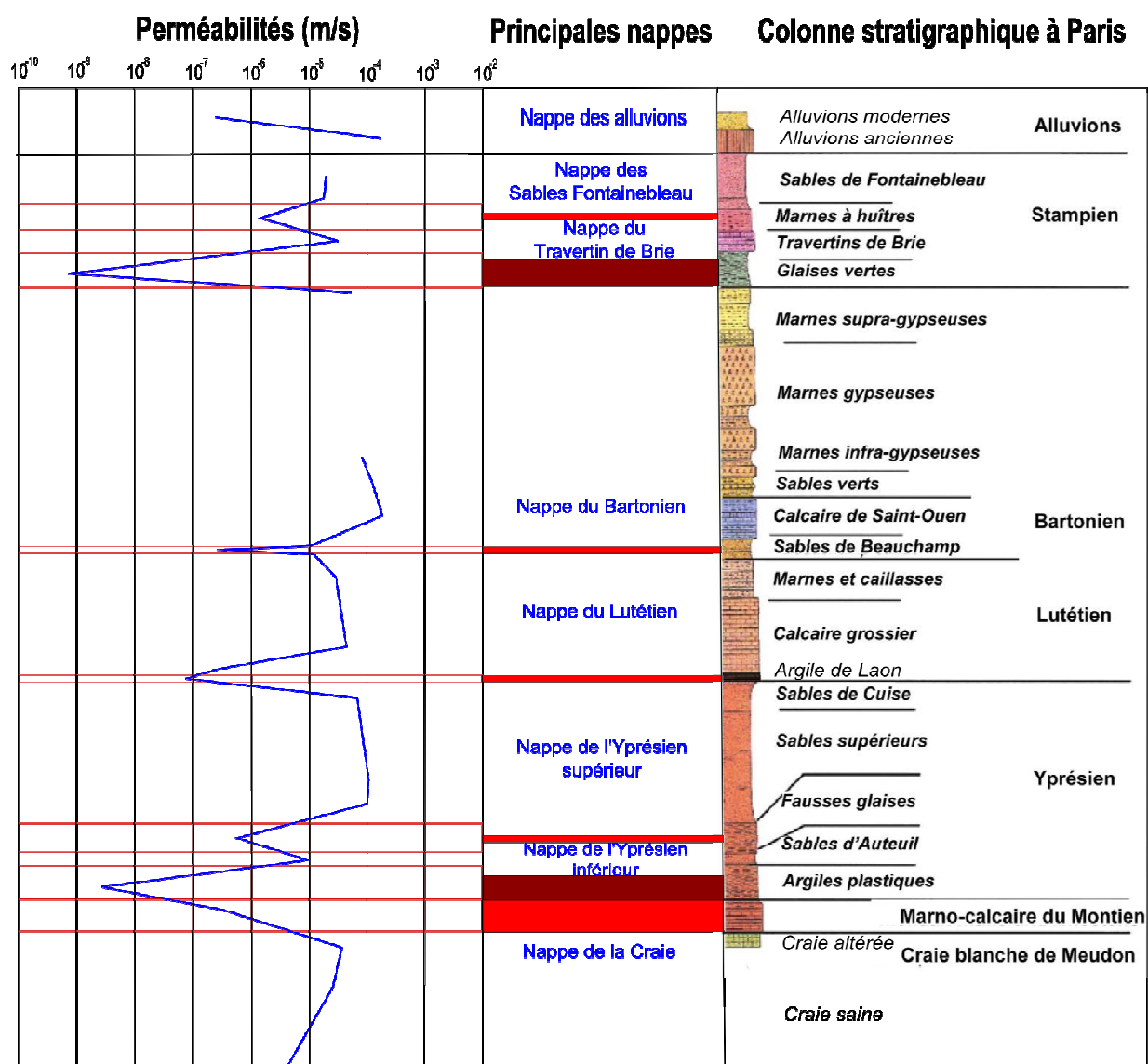


Figure 1. 19: Colonne stratigraphique simplifiée de Paris d'après Thierry et al. (2009) associée aux valeurs médianes des perméabilités des formations hydrogéologiques parisiennes.

D'après la Figure 1. 19 et l'Annexe 1. 27, quatre grandes familles de perméabilités peuvent être distinguées.

- Très faible perméabilité: l'Argile Plastique et les Glaises Vertes
- Faible perméabilité: les Marnes de Meudon, Les Fausses Glaises, l'Argile de Laon, le Calcaire Grossier basal, les Sables de Beauchamp médian, les Marnes à Huîtres et les alluvions modernes.
- Bonne perméabilité: les Sables d'Auteuil, les Sables Supérieurs/Sables de Cuise, le Calcaire Grossier, les Sables de Beauchamp (inférieur et supérieurs), le Calcaire de Saint-Ouen, les Sables Verts, Le Travertin de Brie, les Sables de Fontainebleau et les alluvions anciennes.

- Perméabilité de fissuration: la Craie Blanche de Meudon, les Marnes de Meudon, le Calcaire Grossier, les Marnes et Caillasses, le Calcaire de Saint-Ouen, les Marnes Infragypseuses et le Travertin de Brie. Cette perméabilité de fissuration confère une grande variabilité de perméabilité aux formations concernées.

	Perméabilité médiane (m/s)	Perméabilité moyenne (m/s)	Perméabilité minimum (m/s)	Perméabilité maximum (m/s)	Nombre de mesures
Alluvions modernes	$3,1.10^{-7}$	$9,9.10^{-6}$	$1,1.10^{-8}$	$5,3.10^{-5}$	6
Alluvions anciennes	$1,6.10^{-7}$	$1,3.10^{-3}$	$3.10^{-7}$	$7.10^{-2}$	92
Sables de Fontainebleau	$2.10^{-5}$				
Marnes à Huîtres	$1,6.10^{-6}$	$5.10^{-7}$	$1.10^{-9}$	$3,2.10^{-6}$	
Travertin de Brie	$3,2.10^{-5}$	$4.10^{-5}$	$1,1.10^{-5}$	$1.10^{-4}$	6
Glaises Vertes	$8.10^{-10}$				
Marnes Infragypseuses	$8.10^{-5}$	$4,6.10^{-4}$	$8.10^{-7}$	$1.10^{-3}$	9
Sables Verts	$1,2.10^{-4}$	$1,2.10^{-4}$	$3,9.10^{-5}$	$1,9.10^{-4}$	3
Calcaire de Saint-Ouen	$1,8.10^{-4}$	$6,8.10^{-4}$	$1,5.10^{-7}$	$7,9.10^{-3}$	48
Sables de Beauchamp supérieurs	$1.10^{-5}$	$1.10^{-4}$	$3,3.10^{-7}$	$7,3.10^{-4}$	13
Sables de Beauchamp médians	$2,5.10^{-7}$	$3,9.10^{-7}$	$1,7.10^{-9}$	$1,3.10^{-6}$	16
Sables de Beauchamp inférieurs	$1.10^{-5}$	$9,7.10^{-5}$	$2,5.10^{-6}$	$7,3.10^{-4}$	16
Marnes et Caillasses	$3,1.10^{-5}$	$8,2.10^{-5}$	$1,6.10^{-7}$	$6,1.10^{-4}$	122
Calcaire Grossier	$3,5.10^{-5}$	$8,5.10^{-5}$	$4,5.10^{-7}$	$8,2.10^{-4}$	204
Calcaire Grossier (partie basale)	$3.10^{-7}$	$3,8.10^{-7}$	$1.10^{-8}$	$9,6.10^{-7}$	33
Argile de Laon	$8,8.10^{-8}$	$8,8.10^{-8}$	$5.10^{-8}$	$1,3.10^{-7}$	2
Sables Supérieurs	$1,1.10^{-4}$	$6,8.10^{-3}$	$1,2.10^{-6}$	$2,7.10^{-1}$	49
Fausses Glaises	$6,6.10^{-7}$	$6,5.10^{-7}$	$1.10^{-7}$	$1,2.10^{-6}$	3
Sables d'Auteuil	$1.10^{-5}$	$5,4.10^{-5}$	$1.10^{-6}$	$1,5.10^{-4}$	3
Argile Plastique	$2,7.10^{-9}$	$2,7.10^{-9}$	$1,5.10^{-10}$	$2,5.10^{-9}$	
Marnes de Meudon	$6,5.10^{-7}$	$7,7.10^{-6}$	$6,1.10^{-8}$	$3.10^{-5}$	4
Craie Blanche de Meudon (partie supérieure)	$4,1.10^{-5}$	$1,1.10^{-4}$	$1,9.10^{-6}$	$6,9.10^{-4}$	18

Nombre total de mesures	647
-------------------------	-----

**Tableau 1. 6: Récapitulatif des perméabilités mesurées à Paris et dans sa proche banlieue.**

## → Nappe de la Craie

La Nappe de la Craie est relativement bien isolée des formations géologiques sus-jacentes sauf au niveau de quelques passages sableux de l'Argile Plastique et lorsqu'elle est en contact avec les alluvions anciennes.

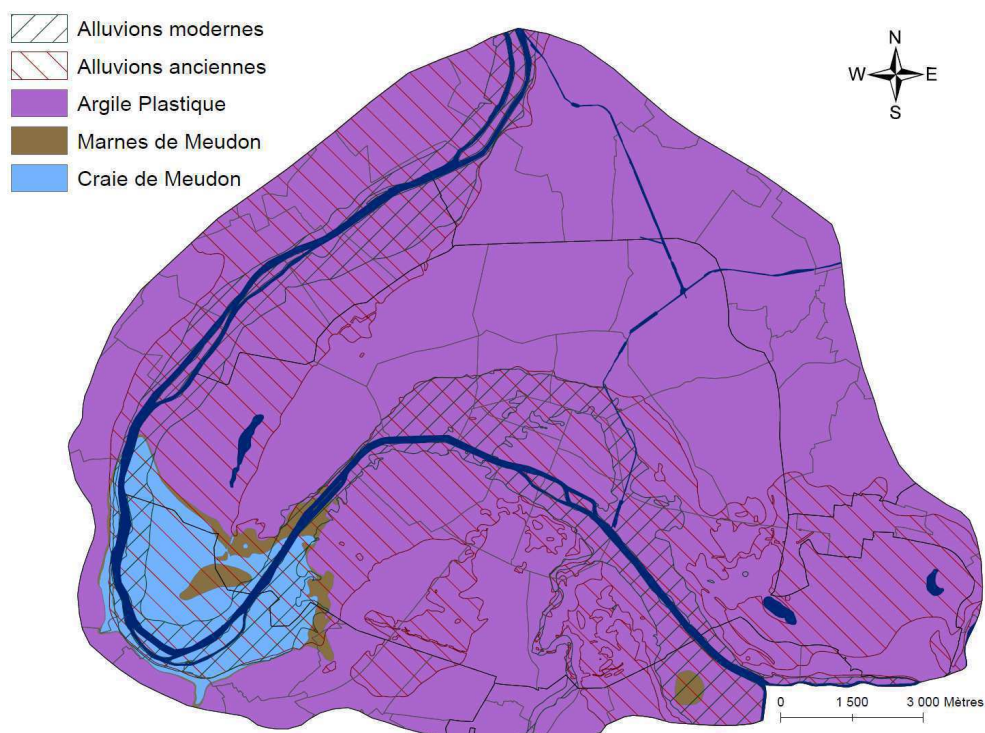
Au cours du temps, la Craie a subi d'importantes déformations tectoniques, surtout dans les zones synclinales où elle s'est disloquée. Dans les anticlinaux, elle est plus compacte, mais des fractures profondes sont présentes. La Craie de Meudon, est une formation qui s'érode facilement, en particulier lorsqu'elle s'est retrouvée à l'affleurement. Selon le degré d'altération, trois zones de perméabilités peuvent être distinguées dans le Tableau 1. 7.

	Profondeur de la Craie	Perméabilité (m/s)
Zone altérée	Entre 0 et 20 mètres	Entre $10^{-1}$ et $10^{-3}$ (voir plus dans les zones karstifiées)
Zone fissurée	Entre 20 et 40 mètres	Entre $10^{-4}$ et $10^{-6}$
Zone saine	Supérieure à 40 mètres	Entre $10^{-7}$ et $10^{-8}$

**Tableau 1. 7: Variations de perméabilités dans la Craie.**

Lorsque la Craie est en contact avec les alluvions anciennes (Figure 1. 20), les cotes piézométriques de ces deux formations sont en équilibres et légèrement au dessous ou au dessus du niveau de la Seine. Ces niveaux deviennent alors presque horizontaux.

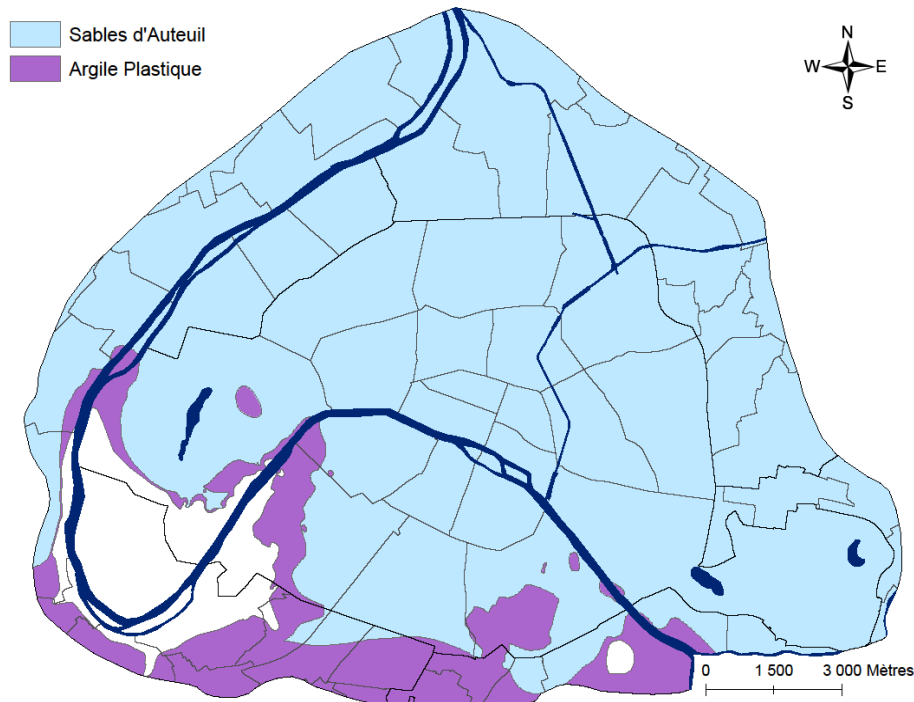
La nappe de la Craie possède un écoulement général vers le nord-nord-est avec une alimentation par la Seine au niveau de la Boucle de Boulogne. Elle est relativement bien isolée des nappes supérieures par l'Argile Plastique sauf en cas de perturbation anthropique.



**Figure 1. 20: Extension de la nappe de la Craie sur la zone d'étude.**

## → Nappe de l'Yprésien inférieur

L'extension géographique des Sables d'Auteuil constituant la nappe de l'Yprésien inférieur est très mal connue, en particulier au sud de la Seine (Figure 1. 21). Ils sont inexistants au niveau de l'Anticlinal de Meudon et possèdent de très faibles épaisseurs au niveau de la rive gauche de la Seine. En rive droite leur cote piézométrique s'équilibre avec l'Yprésien supérieur qui est absent en rive gauche.



**Figure 1. 21: Extension de la nappe de l'Yprésien inférieur et de son substratum d'Argile Plastique sur la zone d'étude.**

## → Nappe de l'Yprésien supérieur

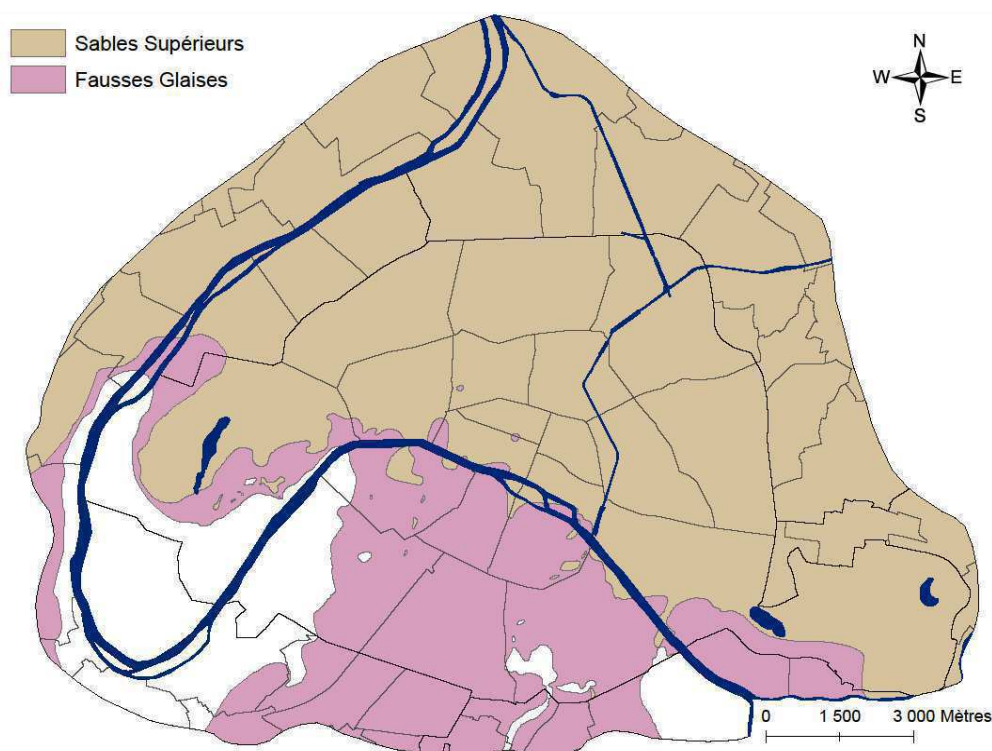
Les sables de l'Yprésien supérieur (Sables Supérieurs et Sables de Cuise) ne s'étendent pas au Sud de la Seine (Figure 1. 22) à l'exception de quelques lambeaux isolés au niveau du boulevard Saint-Germain. Leur épaisseur cumulée peut atteindre 38 mètres au niveau de la fosse de Saint Denis. Ces sables constituent un aquifère captif sur presque toute son étendue. Son niveau piézométrique est bien distinct de la nappe du Lutétien grâce à l'existence de lentilles plus ou moins étendues d'Argile de Laon et de calcaire grésifié à la base du Calcaire Grossier. Localement ces niveaux très peu perméables n'existent pas, ce qui favorise des mélanges entre la nappe du Lutétien et la nappe de l'Yprésien supérieur (comme au niveau du Forum des Halles).

Cette dernière est alimentée par la Seine au centre de Paris et par des écoulements sub-horizontaux provenant de l'est et s'écoule du sud-est vers le nord-est.

La nappe de l'Yprésien supérieur possède un fort potentiel industriel et géothermique, et est exploitée depuis plus d'un siècle (exemple de la Samaritaine qui l'exploite depuis 1910). Ces perturbations, qui ont inversé localement le sens des écoulements, ont engendré des dépressions

piézométriques de plusieurs mètres notamment au niveau du triangle d'or parisien et de la banlieue Nord (la Courneuve, Saint-Denis, Gennevilliers, Villeneuve-la-Garenne, Saint-Ouen ...).

Les perturbations thermiques engendrées dans le sous-sol parisien (galeries de la RATP, parkings, réseaux d'assainissement, géothermie...), modifient la température des eaux souterraines. La nappe de l'Yprésien supérieur possède, en milieu non perturbée, une température proche des 13,5°C. En février 1977 (Diffre et al., 1977), la température de la nappe en périphérie du Louvre avoisinait 15°C, alors que la température de la Seine était de 7°C. Depuis, de nombreux forages alimentant des systèmes de climatisations se sont développés, ce qui laisse présager une nouvelle augmentation des températures de la nappe.



**Figure 1. 22: Extension de la nappe de l'Yprésien supérieur et de son substratum (Fausses Glaises) sur la zone d'étude.**

→ Nappe du Lutétien

La Nappe du Lutétien (Figure 1. 23) est présente dans la majorité du sous-sol parisien (excepté dans la boucle de Boulogne et à Ivry-sur-Seine). Les formations géologiques la contenant sont, de bas en haut: le Calcaire Grossier (perméabilité moyenne:  $7,6 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ ), les Marnes et Caillasses (perméabilité moyenne:  $6 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ ), et les Sables de Beauchamp inférieurs (perméabilité moyenne:  $8 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ ).

La nappe lutétienne peut être localement totalement asséchée comme dans le 15<sup>e</sup> et 16<sup>e</sup> arrondissement de Paris. En bordure de la Seine son niveau piézométrique avoisine celui des alluvions anciennes, elles même en relation hydraulique avec la Seine. En rive gauche la nappe du



Lutétien est libre et ne dépasse pas quelques mètres d'épaisseur. Dans la zone synclinale de Saint-Denis, la nappe lutétienne est fortement captive. Le toit de cette nappe est constitué de niveaux gréseux et argileux contenus dans les Sables de Beauchamp. Ces niveaux peuvent être discontinus comme l'attestent certains sondages ce qui favorise localement des connexions entre la nappe du Bartonien et du Lutétien.

Les Marnes et Caillasses qui constituent une partie de l'aquifère du Lutétien peuvent se comporter localement comme un système hydrogéologique multicouche renfermant plusieurs petites nappes indépendantes.

La nappe est alimentée par des eaux provenant de l'anticlinal de Meudon, mais également par la banlieue Est de Paris. Ces eaux s'écoulent en direction de Gennevilliers, sont drainées en partie par la Seine, et subissent de fortes dépressions piézométriques au centre de Paris. Ces perturbations résultent de prélèvements d'eau pour des activités industrielles, la géothermie, mais également pour éviter l'ennoiment de certaines infrastructures souterraines.

La température de la nappe lutétienne est, à Paris, comprise entre 11,8 et 12,9°C (Diffre et all. 1977). Dans certains cas, elle peut atteindre 20°C, surtout dans les zones où le sous-sol possède une densité de réseaux (chauffage urbain, géothermie, métro, RER ...) très importante.

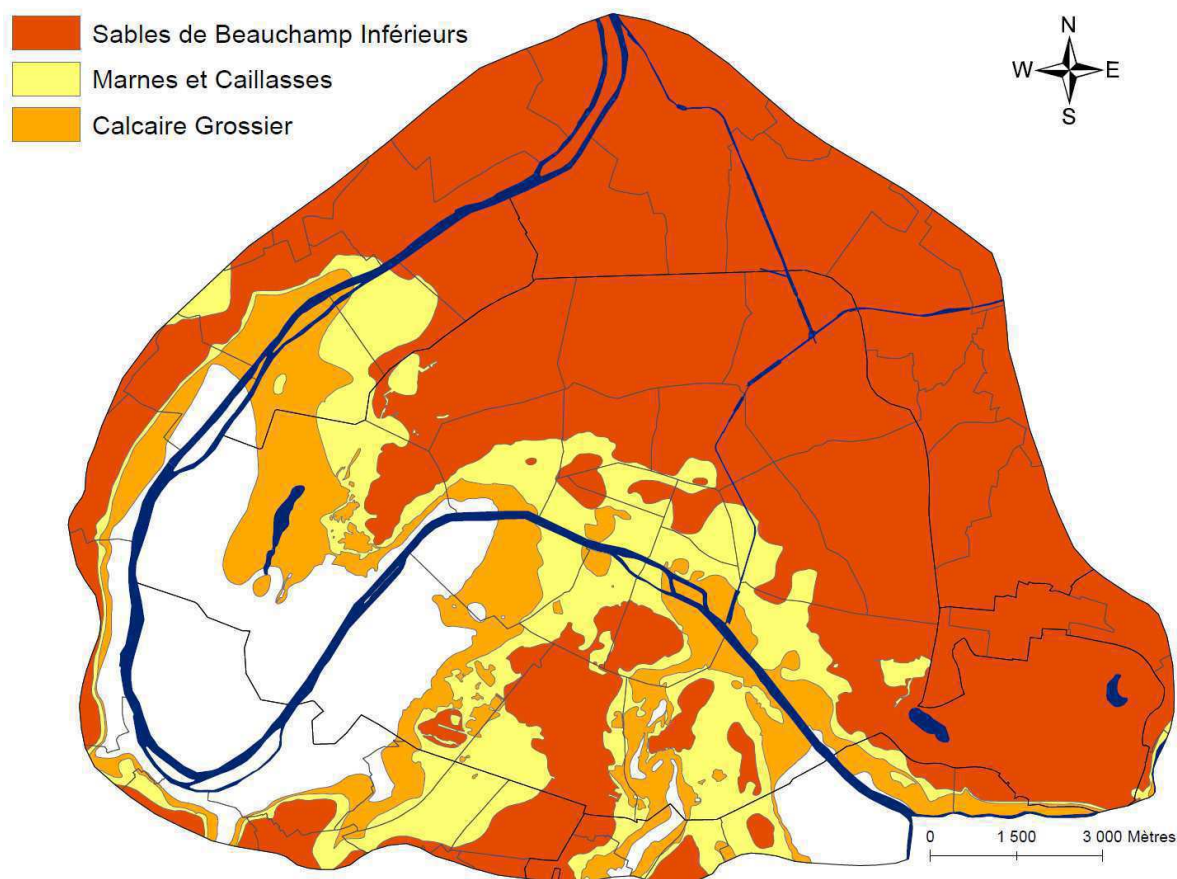


Figure 1. 23: Extension des formations géologiques pouvant contenir la nappe du Lutétien sur la zone d'étude.

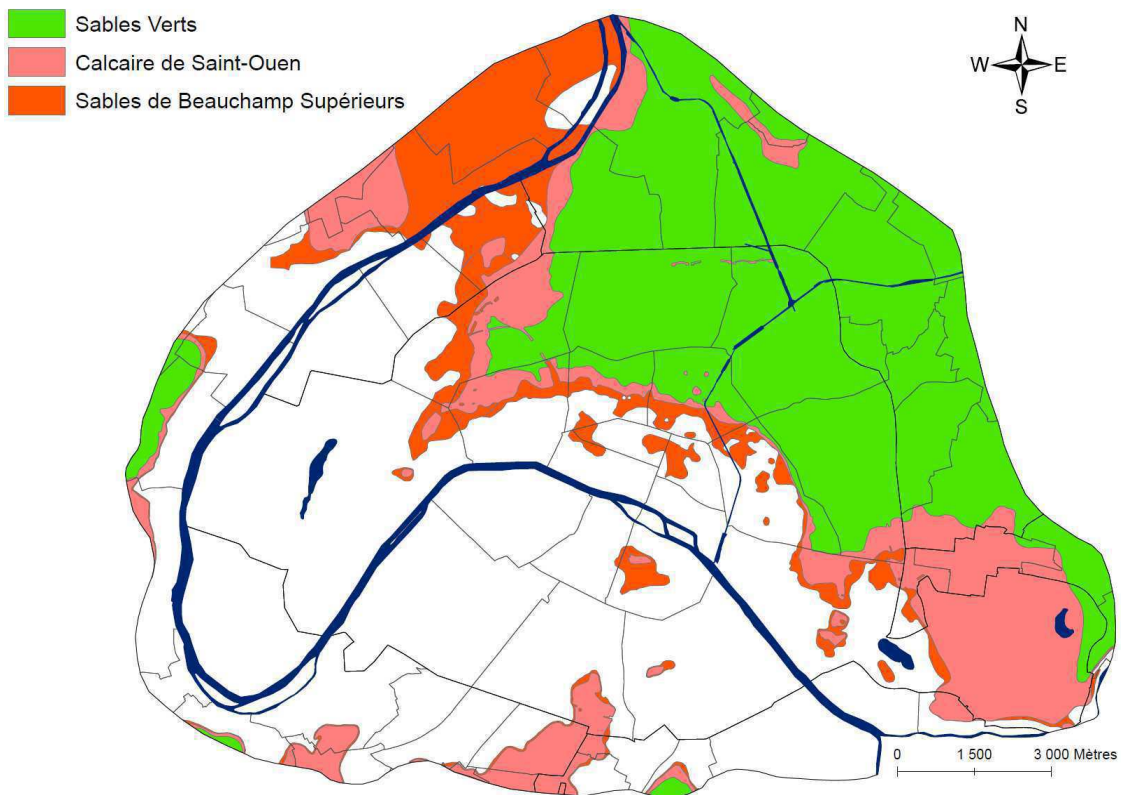
## → Nappe du Bartonien

La nappe du Bartonien est constituée d'un ensemble de formations plus ou moins perméables, formant un aquifère multicouche. Son mur correspond à un niveau grés-argileux des Sables de Beauchamp, ayant une perméabilité moyenne de  $2.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ , que nous appellerons ici Sables de Beauchamp médians.

La nappe du Bartonien se développe dans trois formations géologiques constituées de bas en haut par :

- Les Sables de Beauchamp supérieurs
- Le Calcaire de Saint-Ouen, qui comme son ancien nom l'indique (Travertin et Marnes de Saint-Ouen) possède des bancs marneux discontinus pouvant contenir de petites nappes.
- Les Sables Verts (anciennement appelés Sables Verts infragypseux ou Sables de Cresnes) ont une épaisseur allant jusqu'à 2 mètres. Ces sables souvent marneux ont une perméabilité moyenne est de  $1.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ .

La nappe du Bartonien est surtout présente au nord de la Seine (Figure 1. 24) et est presque asséchée au sud où le Bartonien n'existe que sous forme de lambeaux comportant des hauteurs d'eau de quelques centimètres. Elle n'est jamais captive et possède un niveau piézométrique proche du niveau topographique. Elle communique avec la nappe des alluvions anciennes à proximité de la Seine. Son sens d'écoulement est orienté du sud-est au nord-ouest.



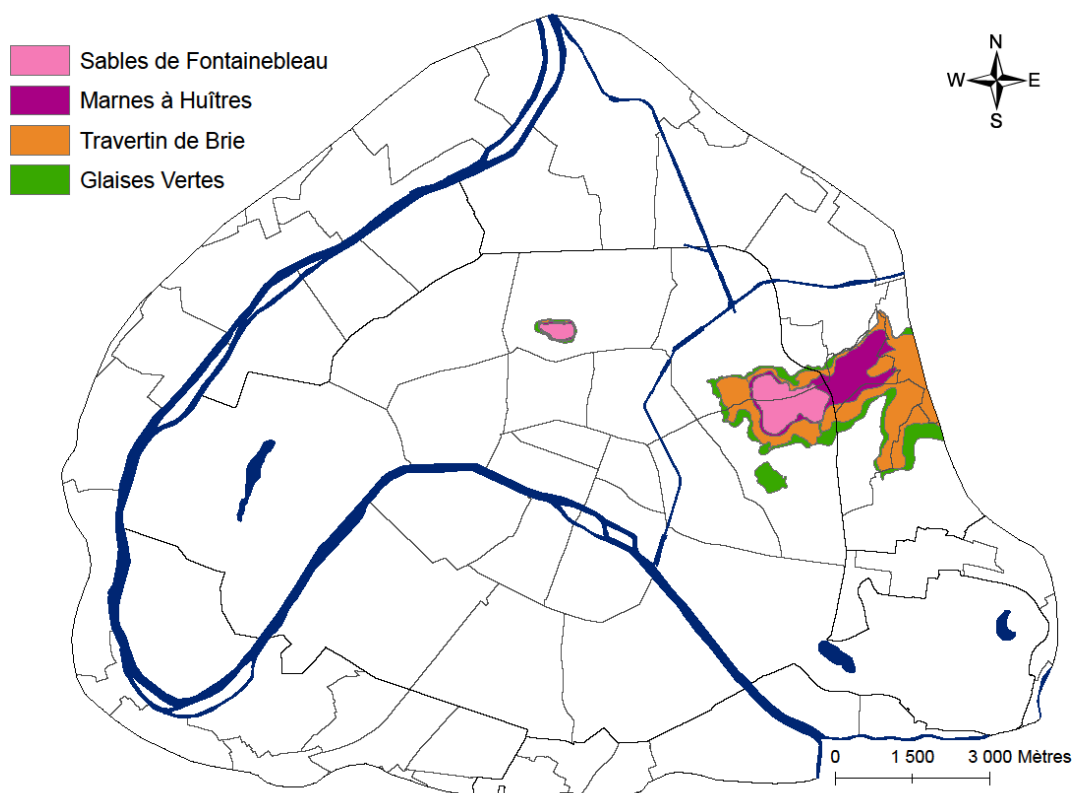
**Figure 1. 24: Extension des formations géologiques pouvant contenir la nappe du Bartonien sur la zone d'étude.**

## → Nappe des Sables de Fontainebleau – Travertin de Brie

La nappe des Sables de Fontainebleau - Travertin de Brie se localise au niveau des buttes témoins (Figure 1. 25). Elle occupe deux niveaux perméables qui sont le Travertin de Brie (appelé aussi Calcaire de Brie) et les Sables de Fontainebleau ainsi qu'un niveau intermédiaire moins perméable (les Marnes à huîtres). Il s'agit d'un aquifère multicouche reposant sur les Glaises Vertes ayant une perméabilité remarquablement faible comprise entre  $10^{-9}$  et  $10^{-10}$  m.s<sup>-1</sup>. L'épaisseur des Sables de Fontainebleau est très variable et peut être très mince comme sur la Butte Montmartre alors qu'elle est bien plus importante sur la Butte de Belleville. La perméabilité moyenne des sables est estimée à  $1,4.10^{-5}$  m.s<sup>-1</sup>.

Ces formations contiennent une faible hauteur d'eau saturée. Son alimentation est aujourd'hui presque complètement artificielle (fuites de réseaux d'adduction d'eau potable et d'eau usées, arrosage d'espaces verts, surfaces pavées....), ce qui lui confère des concentrations importantes en nitrate, sulfate, chlorure et des traces de bore (Ledoux, Magalhaes, 2009). Le niveau piézométrique, n'est pas ou peu influencé par la pluviométrie à cause de la forte imperméabilisation du sol.

Cette nappe alimentait d'anciennes sources (la rivière de Saint-Denys, la Fontenelle, rû de la Fontaine du But ...), utilisées pendant plusieurs siècles pour alimenter les parisiens. Elles sont aujourd'hui canalisées ou taries. L'eau de la nappe, qui n'est pas captée, est drainée dans les remblais en périphérie des Glaises vertes et alimente les nappes sous-jacentes en s'écoulant sur les versant marno-gypseux.



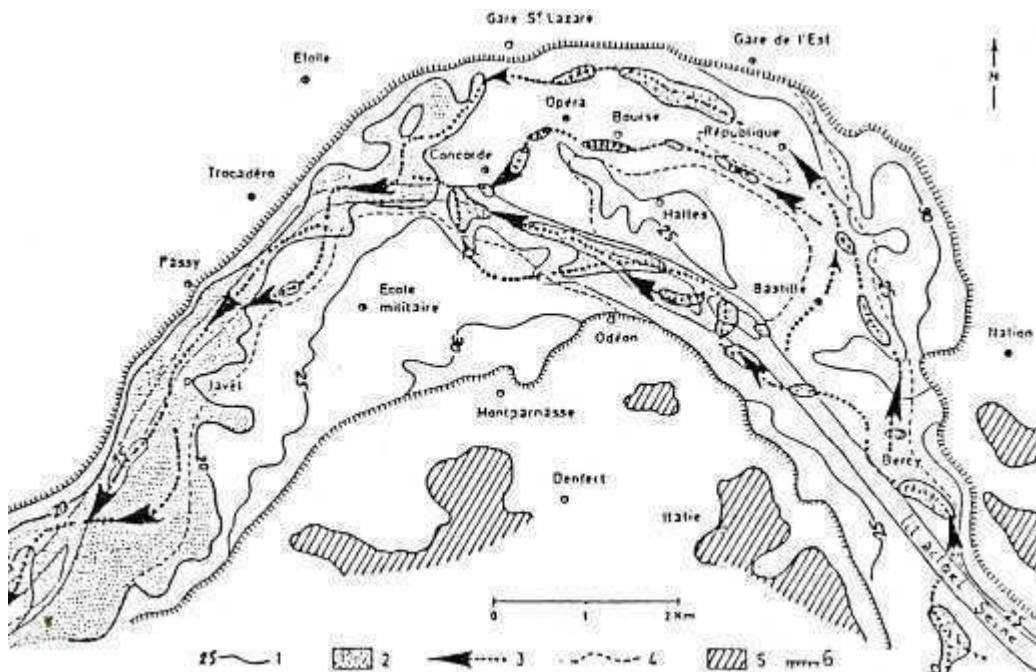
**Figure 1. 25: Extension des formations géologiques pouvant contenir la nappe des Sables de Fontainebleau - Travertin de Brie sur le substratum des Glaises vertes dans la zone d'étude.**



## → Nappe des alluvions

Les alluvions anciennes recouvrent une grande partie de Paris mais ne sont aquifères que dans la « vallée » de la Seine. Les terrasses alluviales situées sur les plateaux (Bois de Vincennes, Bois de Boulogne, 14<sup>e</sup> arrondissement ...) sont totalement sèches. Un paléoméandre protohistorique de la Seine (bien connu depuis les fouilles de Bercy en 1991) part de Bercy, se dirige vers le nord en passant au pied de la butte Montmartre et redescend vers le tracé actuel de la Seine au niveau du pont de l'Alma. La zone hydromorphe, héritée du paléochenal, a longtemps (du 18<sup>e</sup> au début du 19<sup>e</sup> siècle) été exploitée par des cultures maraîchères (NOIZET et al. 2011). Le niveau piézométrique de la nappe était alors proche du niveau topographique. Aujourd'hui les choses sont bien différentes.

Le sens d'écoulement dans les alluvions anciennes dépend en partie (lorsqu'elles ne sont pas perturbées par l'homme) de la répartition géographique des alluvions anciennes (Figure 1. 26). Lorsque le niveau piézométrique de la nappe alluviale remonte, l'écoulement emprunte les axes des paléotalwegs würmiens.



**Figure 1. 26: Structure du substratum de la plaine alluviale à Paris (Diffre, 1969).**

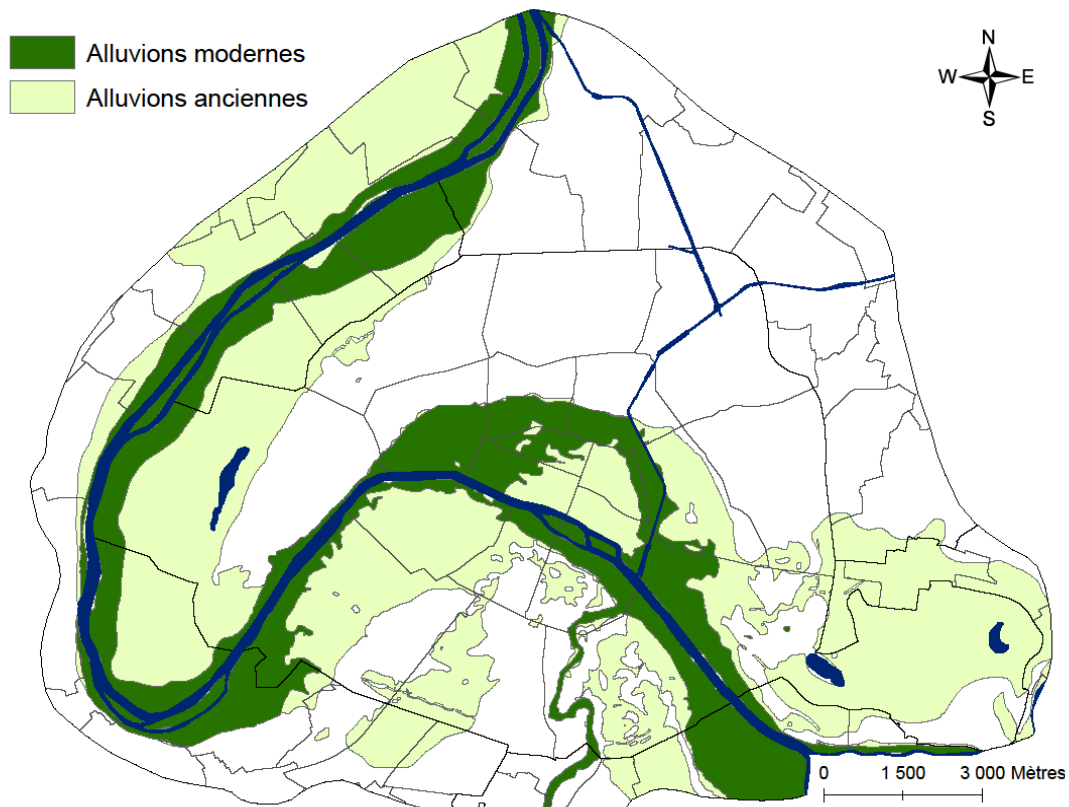
1 : isohypse du substratum des alluvions – 2 : Zones où le substratum est inférieur à 20m – 3 : Axes des paléotalwegs würmiens – 4 : Moyennes terrasses – 5 : Plateformes structurales post Bartonien inférieur – 6 : Limites des alluvions actuelles.

Les alluvions anciennes (Figure 1. 27) sont aquifères dans la vallée basse de la Seine et la nappe peut atteindre plus d'une dizaine de mètres d'épaisseurs dans certaines zones (Courbevoie, Suresnes, Ivry-sur-Seine ...). Lorsqu'elle se retrouve sous les alluvions modernes de faible perméabilité (valeur moyenne de  $7,8 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ ), elle est bien souvent captive.

Les variations piézométriques de la nappe des alluvions anciennes sont en étroite relation avec le comportement hydraulique de la Seine. Ceci est particulièrement vrai lorsque les alluvions

reposent directement sur une formation géologique peu perméable comme l'Argile Plastique. Lorsque la nappe alluviale repose sur d'autres formations aquifères, elle se place en continuité hydrogéologique avec les nappes qu'elles contiennent.

La forte perméabilité ( $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ) des alluvions anciennes combinée à un coefficient d'emménagement élevé (8 à 10%), rend cet aquifère attrayant pour son exploitation. Certains secteurs sont très productifs, surtout lorsque les alluvions anciennes reposent sur le Calcaire Grossier ou la Craie de Meudon.



**Figure 1. 27: Extension des alluvions pouvant contenir la nappe alluviale sur la zone d'étude.**

Des prélèvements intensifs dans la nappe des alluvions anciennes et dans les nappes sous-jacentes, lorsqu'elles sont en communication, ont complètement asséché certaines zones. Ainsi les alluvions anciennes dans le centre de Paris sont sèches, ce qui a modifié le sens des écoulements, en provoquant localement une alimentation de la nappe à partir de la Seine.

### 2.1.2. Synthèse des nappes parisiennes

Les niveaux qui constituent le multicouche de Paris apparaissent comme étant bien distincts, mais avec localement des connexions (Figure 1. 28). Seule la nappe des Sables de Fontainebleau – Travertin de Brie perchée sur une épaisse formation marneuse apparaît bien isolée hydrauliquement. Nous noterons que les nappes réagissent différemment à des phénomènes extérieurs (comme des sollicitations). Ce comportement est à mettre en relation avec les propriétés hydrogéologiques des formations aquifères.

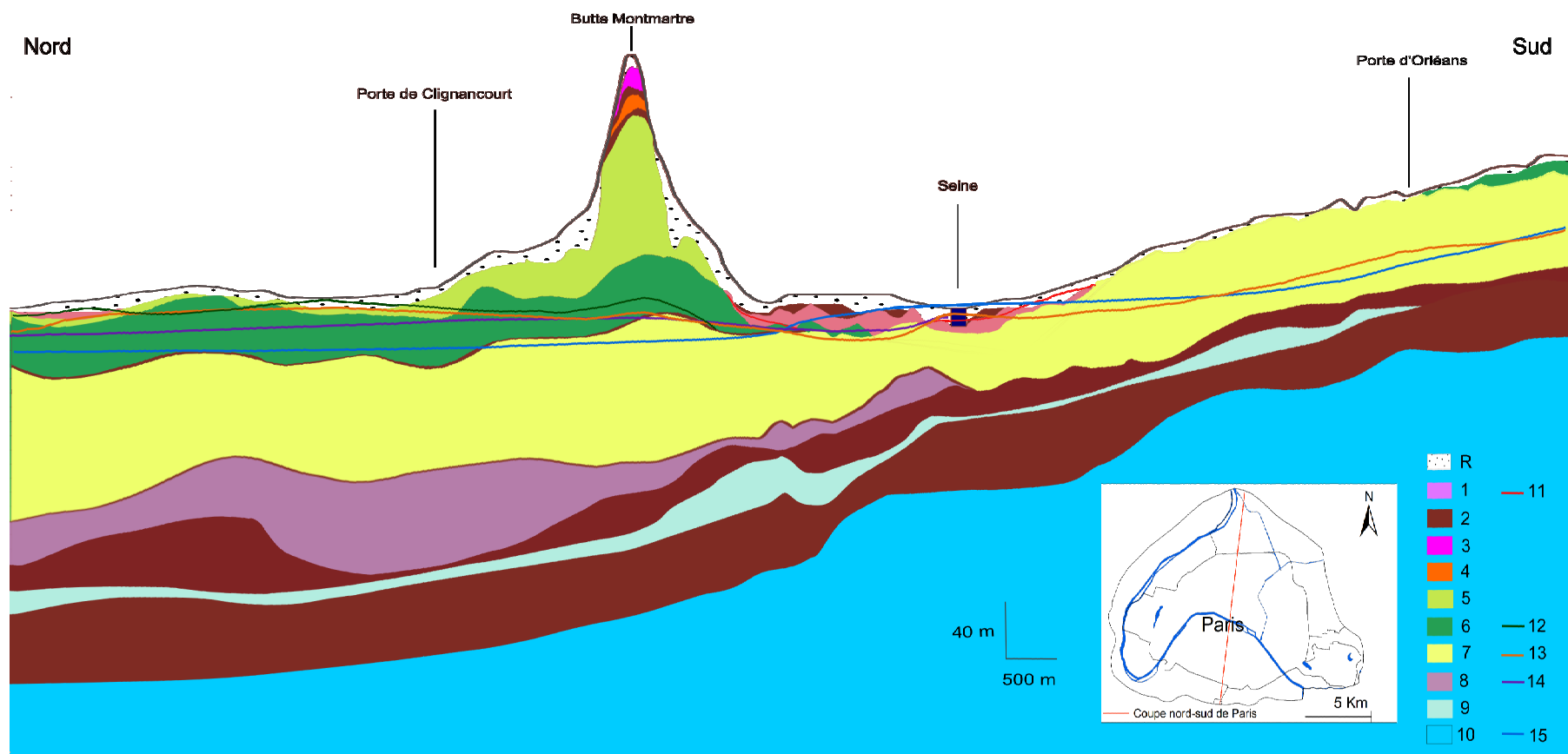


Figure 1. 28: Coupe hydrogéologique N-S de Paris.

R : Remblais – 1 : Alluvions anciennes – 2 : Formations peu perméables – 3 : Aquifères des Sables de Fontainebleau – 4 : Aquifère du Travertin de Brie – 5 : Marnes Infragypseuses et Masses et Marnes du Gypse – 6 : Aquifère du Bartonien – 7 : Aquifère du Lutétien – 8 : Aquifère de l'Yprésien supérieur – 9 : Aquifère de l'Yprésien inférieur – 10 : Aquifère de la Craie – 11 : Niveau piézométrique de la nappe des alluvions anciennes – 12 : Niveau piézométrique de la nappe du Bartonien – 13 : Niveau piézométrique de la nappe du Lutétien – 14 : Niveau piézométrique de la nappe de l'Yprésien inférieur – 15 : Niveau piézométrique de la nappe de la Craie

## 2.2. Réseau hydrographique

A l'origine, le réseau hydrographique parisien était composé de la Seine et de la Marne, ainsi que de nombreux rûs et rivières. Aujourd'hui ce système est fortement anthropisé et de nouveaux éléments rentrent en compte, comme le réseau d'assainissement.

### 2.2.1. La Seine

#### → Caractéristiques de la Seine

La Seine d'une longueur de 776 km prend sa source en Bourgogne (commune de Saint-Germain-Source-Seine) et se jette dans la Manche entre Villerville et le Havre. Elle traverse Paris entre les buttes de Montmartre et de Belleville au nord et la Butte-aux-Cailles au sud sur une distance de 12,78 km. Le fleuve draine le territoire parisien, soit directement, soit par l'intermédiaire de cours d'eau secondaires.

Au cours du temps, la Seine a été totalement canalisée, à Paris et dans sa banlieue, entre deux murs (plus ou moins étanches) implantés dans son lit mineur. Sa largeur est comprise entre 300 mètres (pont de Grenelle) et 30 mètres pour son bras le plus étroit au niveau de l'Île de la Cité (quai de Montebello). Sa profondeur, sur la partie navigable, varie entre 3,4 mètres au pont National et 5,7 mètres au Pont Mirabeau. Cette hauteur d'eau reste constante, car les sédiments (alluvions modernes) qui s'y déposent sont régulièrement dragués afin de ménager un chenal de navigation garantissant un tirant d'eau de 3 mètres. Le dragage rend le fond lit du fleuve perméable.

La cote de la Seine est maintenue constante à 26,4 mètres (NGF orthométrique) grâce au barrage éclusé de Port-à-l'Anglais (communes de Vitry-sur-Seine et Alfortville) en amont et à l'écluse de Suresnes en aval qui fixe le niveau à 23,56 m NGF orthométrique. Afin d'éviter toute stagnation, la surface du fleuve possède une pente de 0,03% permettant à l'eau de se déplacer à une vitesse moyenne de 2 km/h. Chaque année la Seine charrie 40 000 tonnes de sédiments.

Au fil des saisons, la température de la Seine (Tableau 1. 8) évolue en fonction de la température atmosphérique.

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Températures de la Seine (C°)</b>	5	7	9	12	16	20	22	22	19	16	10	7

**Tableau 1. 8: Températures moyennes de la Seine à Paris (André et al 1977)**

Les nappes qui se trouvent en connexion avec le fond de la Seine sont influencées par ces modifications. Sous l'effet de prélèvements d'eau, l'influence de la Seine sur leurs températures (Figure 1. 29) est ainsi de 1000 mètres sur une profondeur de 50 mètres. Les niveaux aquifères considérés, qui ont une température moyenne comprise entre 13 et 15 °C, subissent grâce à la Seine des oscillations saisonnières de 2 à 3°C. Ces cycles de températures sont décalés de plusieurs mois

(environ 3 mois) par rapport aux cycles du fleuve (André, Diffre, Gringarten et Landel, 1977). Les réinjections résultant de la géothermie de très basse température influencent également les températures des nappes.

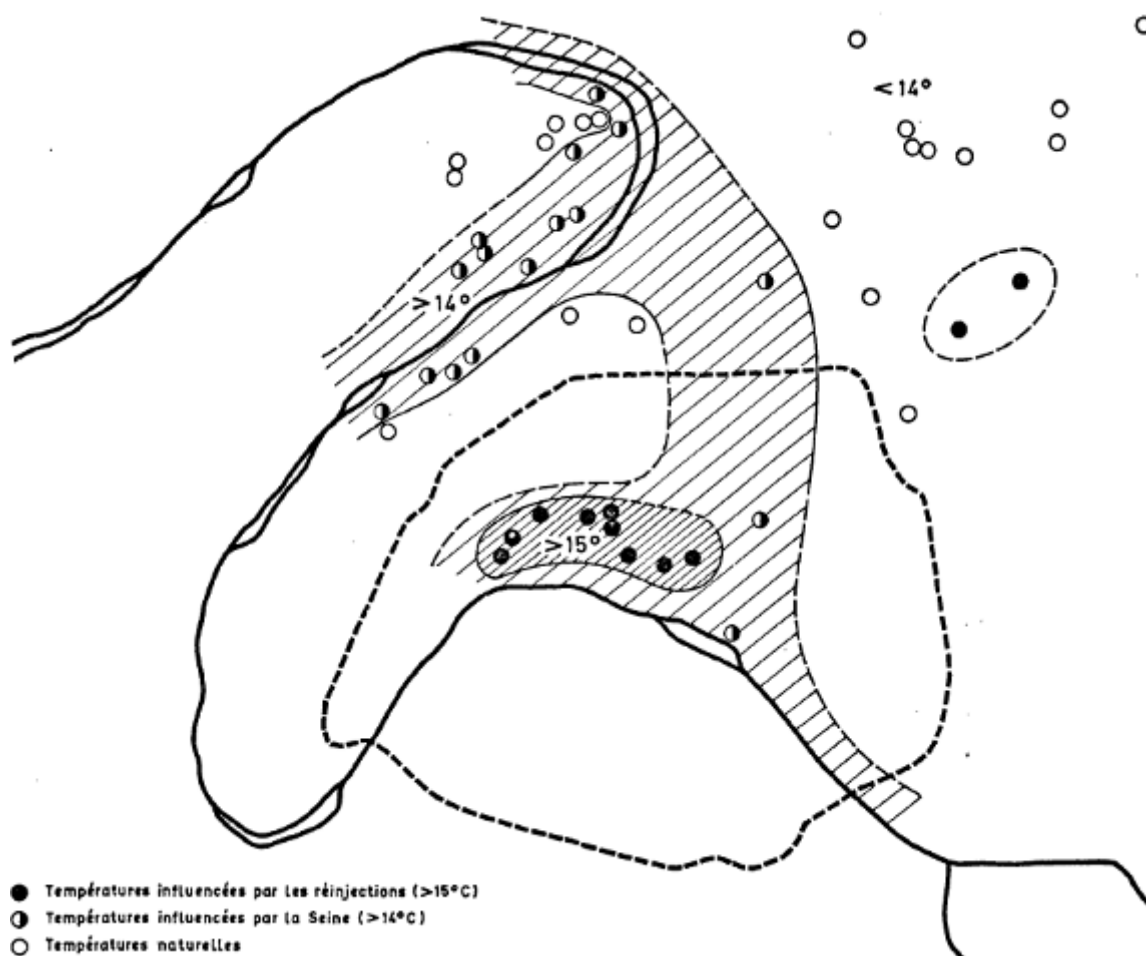


Figure 1. 29: Carte de la répartition des températures à moins de 50m de profondeur en février 1977 (André, Diffre, Gringarten et Landel, 1977).

Le débit moyen de la Seine (Tableau 1. 9) est 308 m<sup>3</sup>/s (1993-2012); durant les hautes eaux, il est de 550 m<sup>3</sup>/s et de 100 m<sup>3</sup>/s à l'étiage (Ville de Paris). Ce débit est influencé en crue comme en étiage par les lacs-réservoirs. Avant leur création, la Seine a connu à plusieurs reprises des débits extrêmes inquiétants, comme en 1949 (12 m<sup>3</sup>/s), 1950 (16 m<sup>3</sup>/s) et surtout durant la crue de 1910 (2400 m<sup>3</sup>/s).

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Débits moyen de la Seine (m<sup>3</sup>/s)</b>	540	524	476	369	280	164	154	149	159	212	267	417

Tableau 1. 9: Débits moyen (m<sup>3</sup>/s) de la Seine entre 1993 et 2012 au pont d'Austerlitz (Banque hydro).

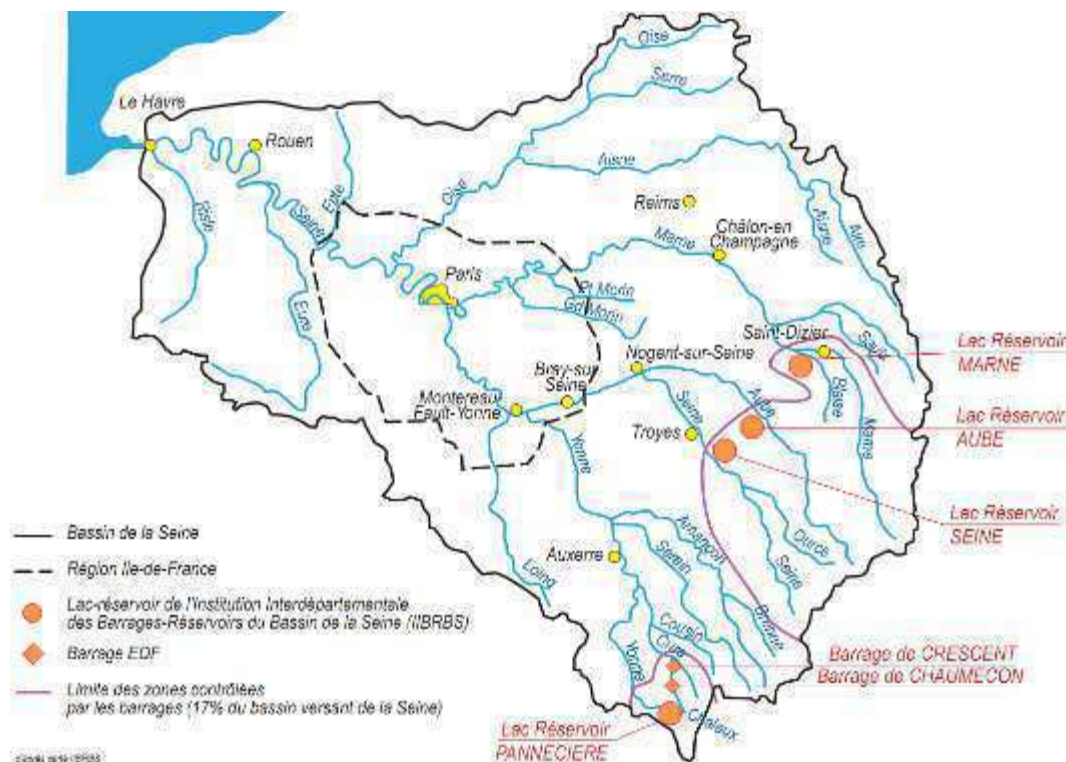
## → Régulation de la Seine

A la suite de grandes crues du début du 20<sup>e</sup> siècle (1910, 1924) et de la sécheresse de 1924, les pouvoirs publics se saisirent du dossier. Le programme d'aménagement du Bassin de la Seine grâce à la construction de 4 lacs-réservoirs fut entrepris dès 1928. Sa double mission était de soutenir les étiages afin d'éviter l'assèchement du fleuve (Annexe 1. 28) et d'écarter les débits de crues sur l'ensemble de la Seine et de ses affluents (Marne, Aube et Yonne). Ce projet fut déclaré d'utilité publique le 25 mai 1959 lors d'un Conseil interministériel. Il s'ensuivit une grande série de chantiers qui s'étala sur une quarantaine d'années (Tableau 1. 10).

	Lac-réservoir Pannecière	Lac-réservoir Seine	Lac-réservoir Marne	Lac-réservoir Aube
Année de Construction	1949	1966	1974	1990
Volume (millions de m <sup>3</sup> )	80	208	350	170
Superficie (ha)	520	2300	4800	2320

**Tableau 1. 10: Dates de constructions des lacs réservoirs.**

Les quatre lacs-réservoirs (Pannecière, Seine, Marne et Aube) ont une capacité de stockage de plus de 800 millions de m<sup>3</sup>, auxquels s'ajoutent 24 millions de m<sup>3</sup> mis à disposition par les barrages EDF (Figure 1. 30). Cette capacité de stockage permet de compenser certaines variations naturelles des cours d'eau et de minorer d'éventuelles crues qui seraient catastrophiques dans une zone qui abrite un sixième de la population française. Les ouvrages permettent surtout de maintenir un niveau d'eau suffisamment élevé pour la navigation en période d'étiage.



**Figure 1. 30: Localisation des lacs réservoirs du Bassin de la Seine (source : EPTB)**

Selon l'Etablissement Public Territorial de Bassin Seine Grands Lacs (EPTB), en cas de crue centennale, le niveau de la Seine serait inférieur de 70 cm à celui de la crue de 1910 grâce aux barrages-réservoirs dans des conditions de gestion optimale des capacités de stockage

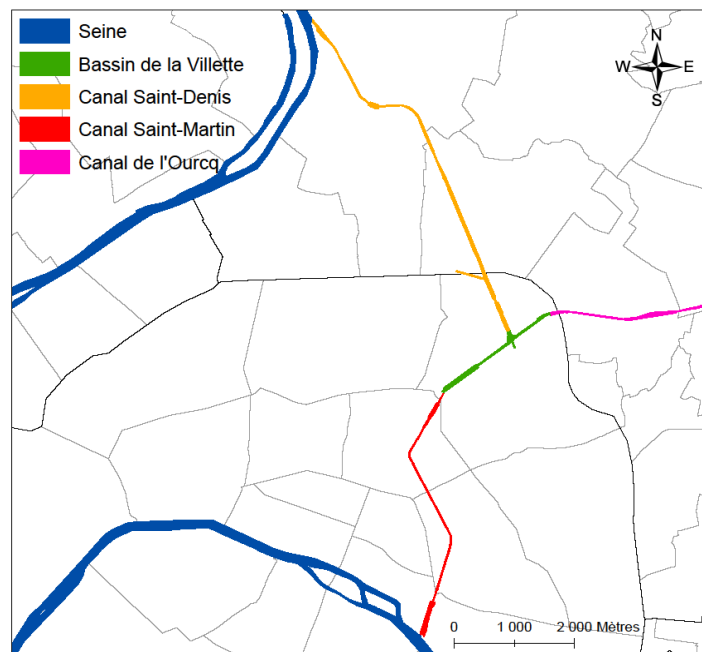
### 2.2.2. La Marne

La Marne d'une longueur de 514,3 km (rivière française la plus longue) prend sa source à Balesmes-sur-Marne (Haute-Marne) et se jette dans la Seine entre les communes de Charenton-le-Pont, Alfortville et Ivry-sur-Seine (Val-de-Marne). Comme la Seine, depuis plus de deux siècles, son lit a été totalement artificialisé en proche banlieue parisienne. Afin de permettre le transport fluvial, et limiter les crues, elle est régulée par le lac-réservoir Marne. Depuis sa mise en service en 1974, les crues hivernales ont fortement diminué à l'exception de l'hiver 2012-2013. Une ligne d'eau est imposée à la rivière par un certain nombre d'écluses (écluse de Saint-Maurice, écluse de Créteil....).

### 2.2.3. Les canaux

Afin d'approvisionner les parisiens qui manquaient cruellement d'eau potable au 18<sup>e</sup> siècle, Napoléon Bonaparte fit construire un système de canaux (Figure 1. 31). Le projet s'acheva en 1825 après 23 ans de chantier.

Les canaux appartenant à la Ville de Paris ont une profondeur moyenne de 2,2 mètres et une largeur comprise entre 16 et 27 mètres. Chaque année 120 millions de mètres cubes d'eau y transitent.



**Figure 1. 31: Canaux parisiens.**

Le Canal de l'Ourcq est alimenté par la Beuvronne (7% de ses apports) et par la rivière de l'Ourcq (93% de ses apports) dans le bassin de la Marne. Il commence sa course, d'une longueur de



108 kilomètres, au niveau de la commune de Claye-Souilly, franchit 10 écluses (Annexe 1. 29) avant de finir dans le bassin de la Villette. A ce niveau, l'eau peut, soit emprunter au Nord le Canal Saint-Denis (6,6 km, 7 écluses et 28 mètres de dénivelé) pour aboutir dans la boucle de Gennevilliers, soit rejoindre la Seine via le Canal-Saint-Martin (4,5 km, 9 écluses et 25 mètres de dénivelé - Annexe 1. 30) en aval du Pont d'Austerlitz. Les canaux alimentent plus de 60% du réseau d'eau non potable de Paris (200 000 m<sup>3</sup>/j).

Il a été constaté (Ph. Roussel, 1976), que le canal de l'Ourcq a une influence non négligeable sur les nappes. Cette étude porte sur un tronçon de 11,8 km (superficie de 22,44 ha) compris entre l'écluse de Sevrans à Aulnay-sous-Bois et le bassin de la Villette où le canal de l'Ourcq montrait un déficit d'écoulement de 100 000 m<sup>3</sup>/j. Il a été démontré que le canal alimente la nappe sous-jacente (nappe du Bartonien) par « suintements » de ses quais. Néanmoins les pertes plus importantes résulteraient de grosses fuites qui n'ont pu être décelées précisément. Depuis, de nombreux travaux ont été effectués par la Ville de Paris afin de rendre le plus étanche possible le réseau de canaux.

### 2.2.4. La Bièvre

La Bièvre (Annexe 1. 31), une rivière de 32,8 km, prend sa source à Guyancourt et se jetait autrefois dans la Seine, au niveau du pont Charles de Gaulle. Au cours de l'accroissement de Paris et de l'implantation de commerces (teinturiers, tanneurs, équeurisseurs...) l'eau de la Bièvre était devenue « fétide et souillée par les déjections d'une grande ville » (E. Belgrand - 1887). Pour des raisons d'hygiène, les terrains bas furent remblayés dès 1858, par le baron Haussmann. En 1881, la rivière fut complètement canalisée et dérivée, à partir de la rue Geoffroy Saint-Hilaire, dans plusieurs collecteurs (Figure 1. 32). La Bièvre, enfin ce qu'il en reste, finit ainsi sa course dans la Seine en différents points. En 1912, les derniers tronçons à la limite de Paris furent recouverts.

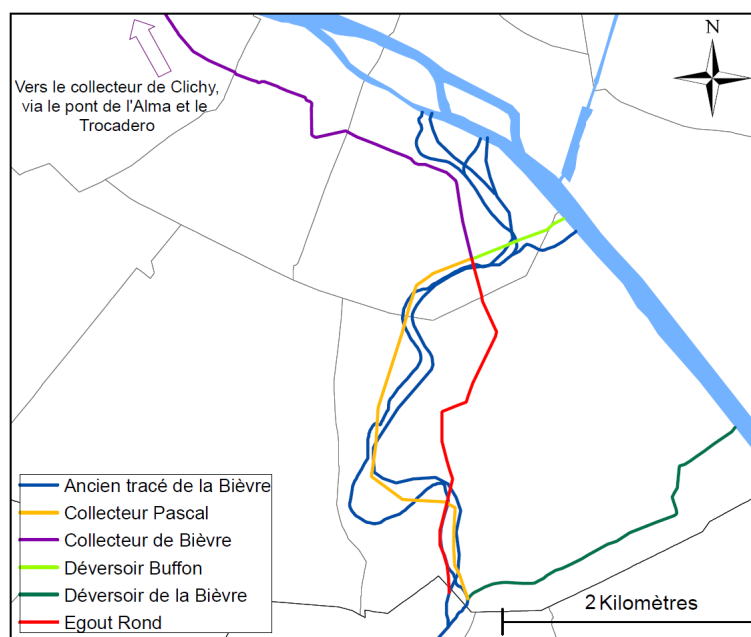


Figure 1. 32: Tracé de la Bièvre.



Aujourd'hui, la Bièvre n'est plus qu'un « égout » (Annexe 1. 32), mais cela n'a pas toujours été le cas. Jusqu'au 18<sup>e</sup> siècle, la rivière était tumultueuse, et inondait régulièrement ses environs. Les vestiges de son activité ont été enregistrés dans l'érosion profonde des horizons bartoniens et lutétiens, allant même jusqu'à attaquer l'Argile Plastique au Sud.

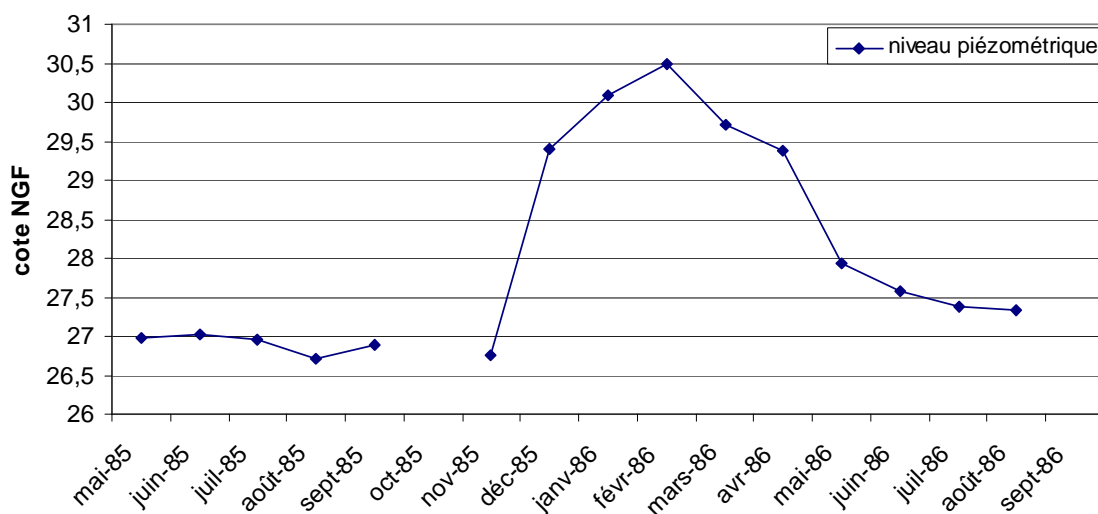
#### 2.2.5. Les lacs

Paris possède six « grands lacs » tous artificiels. Dans le Bois de Boulogne se trouvent deux étendues d'eau, avec le lac Supérieur qui se jette dans le lac Inférieur, construits en 1853 et 1862. Ils sont alimentés par le canal de l'Ourcq (usine de la Villette) et plus anciennement par le puits de Passy (nappe de l'Albien). Leur superficie totale est de 14 hectares sur une profondeur de 2,20 mètres. Le Bois de Vincennes est équipé de quatre lacs. Le lac de Gravelle alimente, grâce à un réseau de ruisseaux, les lacs plus en aval (Tableau 1. 11). L'eau est pompée directement dans la Seine au niveau du pont d'Austerlitz. Chaque jour 5 200 m<sup>3</sup> d'eau (APUR 2010), en provenance du réseau d'eau non potable, alimentent les lacs et les rivières du bois de Vincennes.

	Lac Daumesnil	Lac des Minimes	Lac Saint-Mandé	Lac de Gravelle
Superficie (ha)	10	6	1	1
Profondeur moyenne (m)	1,10	1,5	0,9	

**Tableau 1. 11: Lacs du Bois de Vincennes.**

Les plans d'eau présents à Paris, bien que construits sur un sol préalablement imperméabilisé, peuvent alimenter les nappes à la faveur de fuites. En 1985, le fond de la mare Saint-James (Bois de Boulogne), s'est fissuré. Un piézomètre à proximité a mesuré l'effet sur la nappe de l'Yprésien supérieur qui se trouve juste en dessous (Figure 1. 33). Son niveau piézométrique est remonté de plus de trois mètres. La nappe a retrouvé son niveau une fois les réparations effectuées.



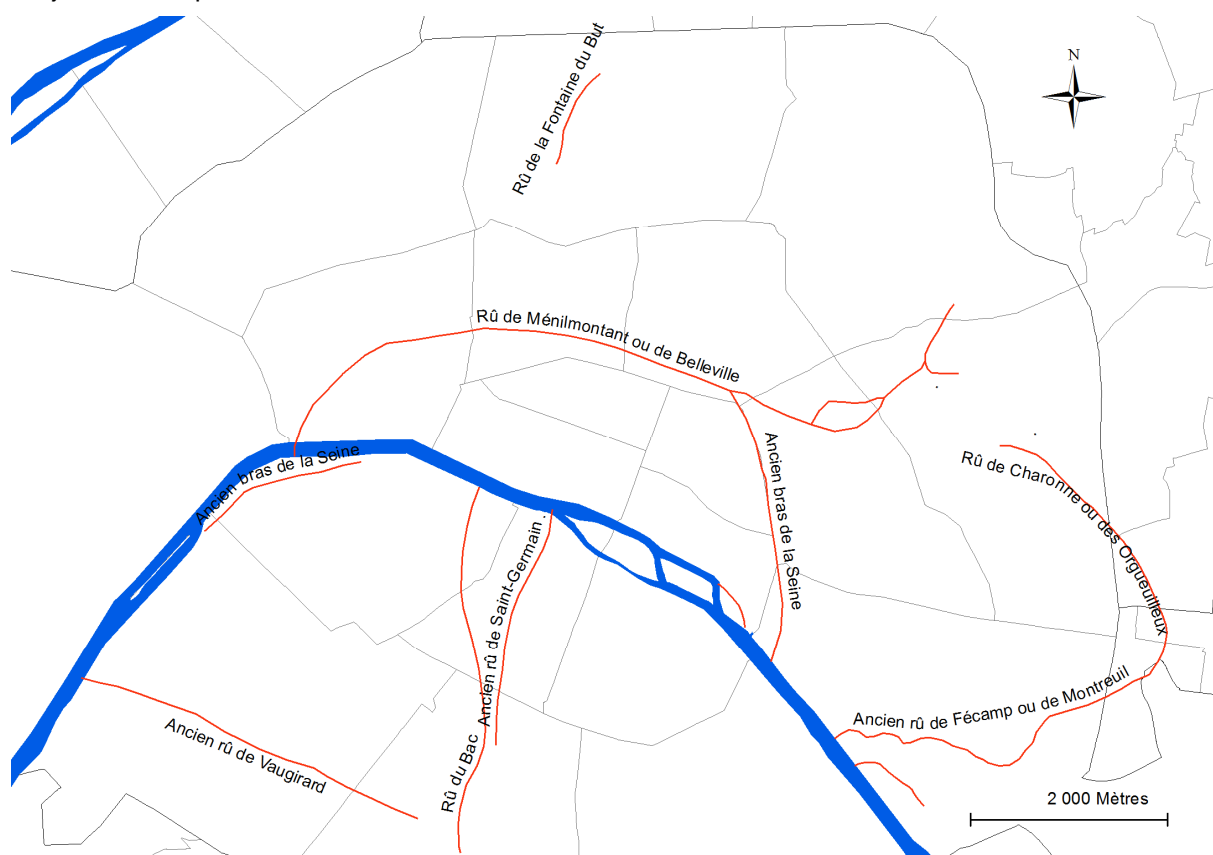
**Figure 1. 33: Effets d'une fuite de la mare Saint-James sur la nappe de l'Yprésien supérieur.**

### 2.2.6. Les rûs

Il existait à Paris un ensemble de cours d'eau mineurs drainés par la Seine (Figure 1. 34).

En rive droite, il y avait le rû de Ménilmontant et le rû de Montreuil. Tous deux avaient leurs sources au niveau de la base des Glaises Vertes sur la Butte de Belleville. Le rû de Belleville empruntait le paléoméandre de la Seine avant de venir s'y jeter au niveau du pont de l'Alma. Aujourd'hui il a rejoint le réseau d'égouts. Quant au rû de Ménilmontant, après avoir incisé les Marnes et Caillasses, il se jetait dans la Seine au pont de Bercy. Il a été remblayé au début du siècle dernier.

En rive gauche, le rû de Vaugirard et le rû de Saint Germain étaient les principaux affluents de la Seine. Ils prenaient leurs sources au niveau de la place d'Alésia (14<sup>e</sup> arrondissement). Ils ont aujourd'hui disparu.



**Figure 1. 34: Carte des anciens rûs parisiens (d'après IGC).**

### 2.2.7. Les anciennes sources

A Paris, il existait de nombreuses sources localisées au niveau des buttes témoins oligocènes. Elles étaient réputées calcaires et depuis ont été soit canalisées en égouts, soit asséchées.

On dénombrait jusqu'au milieu du 19<sup>e</sup> siècle plus d'une dizaine de sources et fontaines sur la butte Montmartre. Leurs noms étaient des plus variés (la fontaine du Buc, la fontaine Saint-Denys, la

Fontenelle, la fontaine de la Bonne-Fée ou de la Bonne-Eau...). Elles alimentaient tout le village de Montmartre. Aujourd'hui, il ne reste comme témoins que le nom de certaines rues (rue de l'Abreuvoir, rue du Ruisseau...). Certaines sources ont été modifiées durant l'exploitation des carrières de gypse de Montmartre jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle. Ainsi, les sources qui donnaient naissance à des rûs s'écoulant sur des Glaises Vertes, s'infiltrant aujourd'hui à travers les remblais de carrières pour alimenter les nappes sous-jacentes et donnent ainsi lieu à des circulations d'eau erratiques dans les remblais et dans les Marnes Infragypseuses.

Au cours du temps, Paris a toujours manqué d'eau potable même en considérant les normes sanitaires de l'époque. Ainsi dès le 11<sup>e</sup> siècle, divers établissements religieux (léproserie de Saint-Lazare ...) firent venir de l'eau grâce à des aqueducs. Ces eaux provenaient de la Butte de Belleville. Un système de plus en plus complexe s'est mis en place au fil des siècles pour approvisionner à raison de 346 m<sup>3</sup>/j d'eau « propre » les 200 000 habitants (1669) de Paris (Barles et al.). Le système de captages dit Sources du Nord étaient donc institué (Figure 1. 35). Des conduites serpentaient (et serpentent toujours) à travers des pierrées du versant ouest de la colline. Par exemple, à la limite du 19<sup>e</sup> arrondissement, du Pré Saint-Gervais et des Lilas, l'eau issue d'un groupe de quatre pierrées, qui fonctionnait encore jusqu'au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, convergeait vers le regard du Trou Morin avant d'être acheminée vers le prieuré Saint-Lazare. Le débit variait de 100 à 300 litres par minute en fonction des saisons. Dans le 19<sup>e</sup> arrondissement on trouve encore le regard des Mauxins dans lequel viennent déboucher trois conduites d'eau de pierrées. Son eau se mélange dans un grand bassin avant d'être dirigée vers le regard du Bernage par une conduite souterraine menant au réseau d'assainissement. Son débit varie de 12 à 150 litres par minute. (F. Diénert 1948).

Aujourd'hui, les sources du Nord ne sont plus utilisées, mais cet ancien réseau est toujours en place. Il n'est plus complet, et des tronçons manquent. Ainsi une partie de l'eau collectée grâce à ces aqueducs termine sa course dans les égouts, alors qu'une autre alimente les nappes. Ni les volumes, ni les lieux de recharges ne sont connus. Ce réseau est vraisemblablement responsable de l'assèchement d'une partie de la nappe du Travertin de Brie dans le 19<sup>e</sup>.

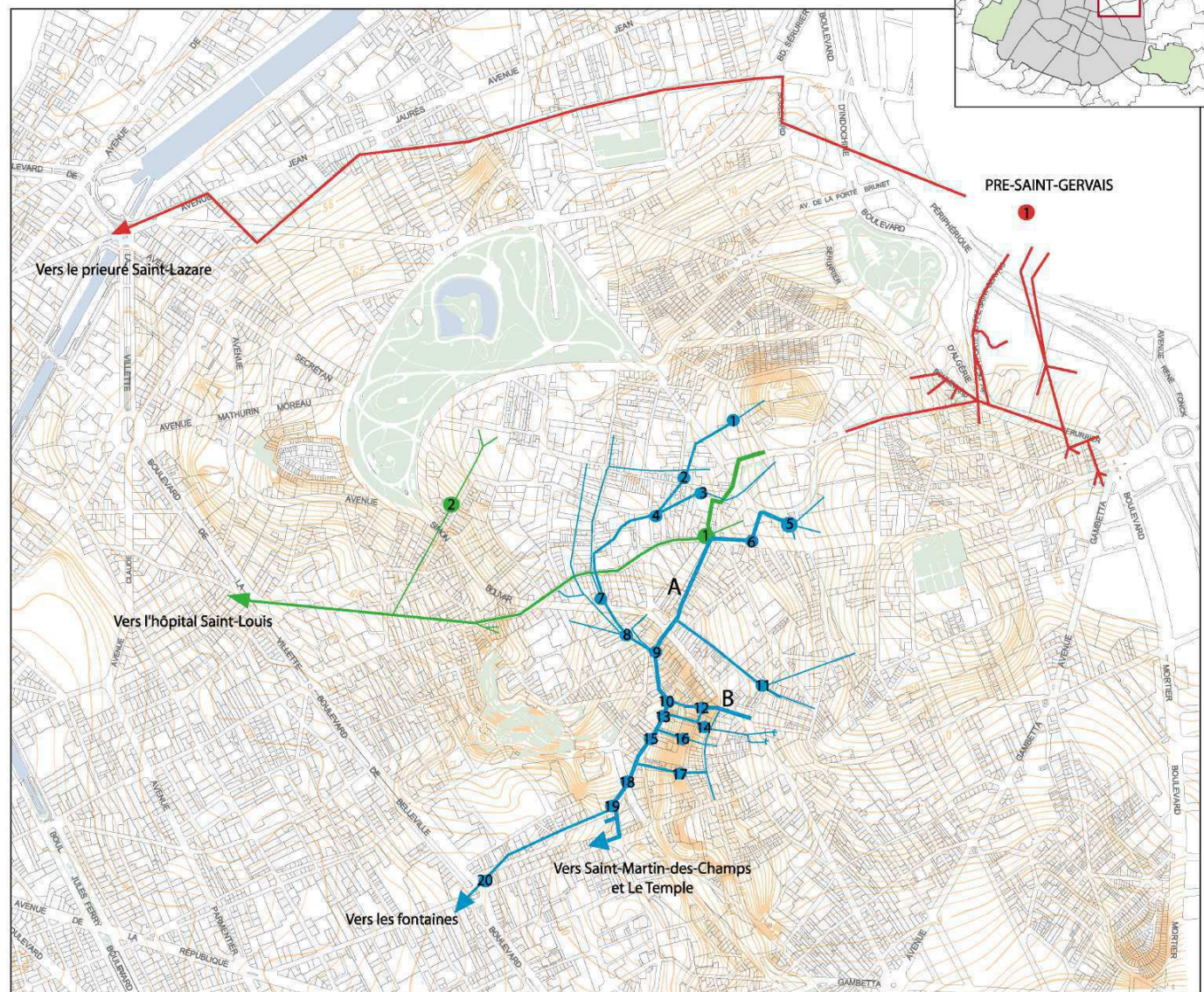
#### 2.2.8. Le réseau d'assainissement

Le premier réseau d'assainissement parisien a été implanté, au niveau de l'actuel boulevard Saint-Michel, il y a plus de 2000 ans par les Romains, puis il fut abandonné. Sous Charles V, en 1370, le prévôt de Paris, Hugues Aubriot, relance le projet. Alors commence une longue histoire de l'évolution du réseau d'égouts qui prit toute son ampleur à partir de 1854 sous l'impulsion d'Eugène Belgrand et du Baron Haussmann.

Petit à petit, le nombre de Parisiens s'accrut, tout comme le nombre de puits et d'aqueducs alimentant la capitale en eau potable selon les critères de l'époque. Dès 1852, chaque immeuble devait être raccordé aux égouts pour les eaux de cuisine et la loi du Tout à l'égout de 1894, supprima les fosses d'aisance qui polluaient les nappes et créaient des effondrements en carrières. Le réseau d'assainissement devait évoluer.



## LES SOURCES DU NORD



Sources cartographiques : MICHEL. Plan des sources de Belleville. 1856. (B.H.V.P. cote G73).

Tracé du grand aqueduc de Belleville et de l'aqueduc Saint-Louis à travers Belleville. (B.H.V.P. cote G74).

TESSON. Plan des eaux de Belleville. 1899. (B.H.V.P. cote G75).

## EAUX DU PRE-SAINT-GERVAIS

— aqueduc, conduite, pierrée

1. Regard de prise des eaux

## EAUX DE L'HOPITAL SAINT-LOUIS

— aqueduc  
— conduite  
— pierrée1. Regard Saint-Louis\*\*  
2. Regard des Esmocoudars °

## EAUX DE PARIS

— aqueduc  
— conduite  
— pierréeA. Grand aqueduc de Belleville  
B. Aqueduc Saint-Martin

- |   |   |
|---|---|
| 1. Regard des Saussaies +                             | 11. Regard des Grandes Rigoles °                |
| 2. Regard des Marais +                                | 12. Regard Saint-Martin**                       |
| 3. Regard Lecouteux**                                 | 13. Regard de la Chambrette**                   |
| 4. Regard du Chaudron**                               | 14. Regard des Petites Rigoles**                |
| 5. Regard de La Lanterne**                            | 15. Regard de Planchette**                      |
| 6. Regard Beaufils +                                  | 16. Regard de la Roquette**                     |
| 7. Regard de Blanche-Bardou °                         | 17. Regard des Messiers**                       |
| 8. Regard des Envierges °                             | 18. Regard du Zouave**                          |
| 9. Regard des Cascades**                              | 19. Regard de la prise des eaux de Belleville + |
| 10. Regard des religieux de** Saint-Martin-des-Champs | 20. Regard Décadaire °                          |

\* inscrit I.S.M.H

+ démol

\*\* classé M.H.

° disparu

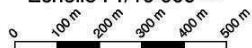
Echelle : 1/10 000<sup>ème</sup>

Figure 1. 35: Cartographie des sources du Nord (document d'après Tesson en 1889).

Alors qu'à ses débuts, son rôle était d'évacuer les immondices jonchant les rues, à partir du milieu du 19<sup>e</sup> siècle, ses missions se diversifièrent. Il devait dorénavant évacuer les eaux domestiques et industrielles, en plus des eaux pluviales. Dans sa restructuration, ce réseau a été mis à profit en intégrant des conduites du réseau d'eau potable et du réseau d'eau non potable destiné au lavage des rues, au curage des égouts et à l'arrosage d'espaces verts.

Afin de favoriser les écoulements d'eau, Belgrand et ses successeurs ont façonné les égouts comme un bassin versant, en les calant sur la topographie. Chaque rue parisienne possède aujourd'hui un égout élémentaire qui se déverse dans un collecteur secondaire puis un collecteur principal (Figure 1. 36), avant de rejoindre les stations d'épuration Seine-Aval (anciennement Achères) et Seine Centre, via un émissaire. Des déversoirs d'orages sont également prévus pour des rejets directs dans la Seine en cas de fortes précipitations. Au siècle dernier, le réseau d'assainissement parisien s'est rapidement étendu en passant de 500 km en 1850, à 600 km en 1878 et à 1 500 km en 1900. Il mesure aujourd'hui selon la Ville de Paris 2 500 km et se compose de :

- 1 500 km d'égouts élémentaires
- 130 km de collecteurs (Annexe 1. 33)
- 200 km d'ouvrages non visitables (canalisations enterrées, siphons, déversoirs)
- 670 km d'ouvrages annexes (branchements particuliers, 30 000 branchements de regard et 20 000 bouches d'égout assurant l'évacuation des eaux pluviales)

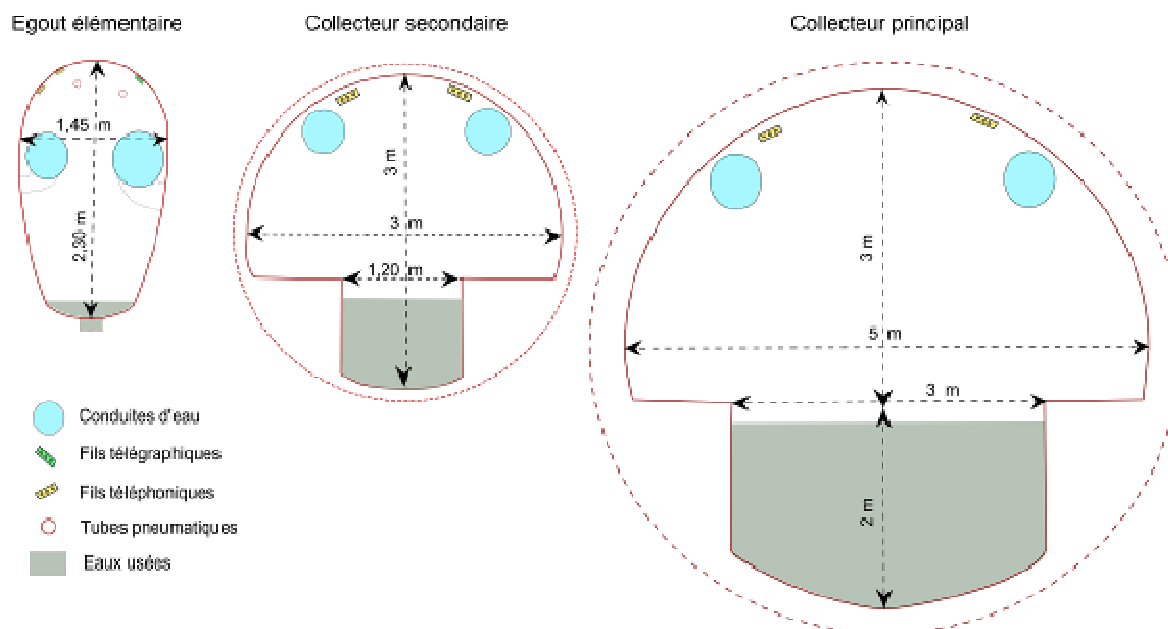


Figure 1. 36: Types d'égouts parisiens.



Le réseau d'assainissement joue également un rôle de galerie technique en abritant en plus des réseaux d'eau potable et non potable un certain nombre d'ouvrages comme une partie du réseau de froid urbain (Climespace), du réseau de la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain (CPCU) ainsi que des câbles de très basse tension ou des fibres optiques. Anciennement, d'autres réseaux l'empruntaient comme les tubes pneumatiques (Annexe 1. 34), les fils télégraphiques ou les tubes d'horloges pneumatiques.

Le réseau d'assainissement (Figure 1. 37), géré par Section Assainissement de Paris (SAP), est unitaire, gravitaire (hormis quelques quartiers nouveaux du 12<sup>e</sup> et 13<sup>e</sup> arrondissement où l'usage de pompes est nécessaire) et visitable, ce qui en fait toute sa particularité. Bien que certaines sections d'émissaires se trouvent à plus d'une vingtaine de mètres sous la surface, le réseau se trouve généralement à une profondeur comprise entre 2 mètres et 5 mètres. La pente moyenne des égouts est de 0,8%, alors que celle des collecteurs est inférieure à 0,1% (Gromaire-Mertz, 1998). Chaque jour entre 800 000 m<sup>3</sup> et 900 000 m<sup>3</sup> d'eaux (Mairie de Paris, 2006) y circulent en moyenne.

Bien que la totalité du réseau soit inspecté deux fois par an, cela n'empêche pas totalement l'apparition de fuites. Celles-ci sont estimées à 10 % par la Ville de Paris. Le volume de ces pertes d'eau serait ainsi compris entre 29 et 32 millions de m<sup>3</sup> par an qui alimentent directement les nappes.

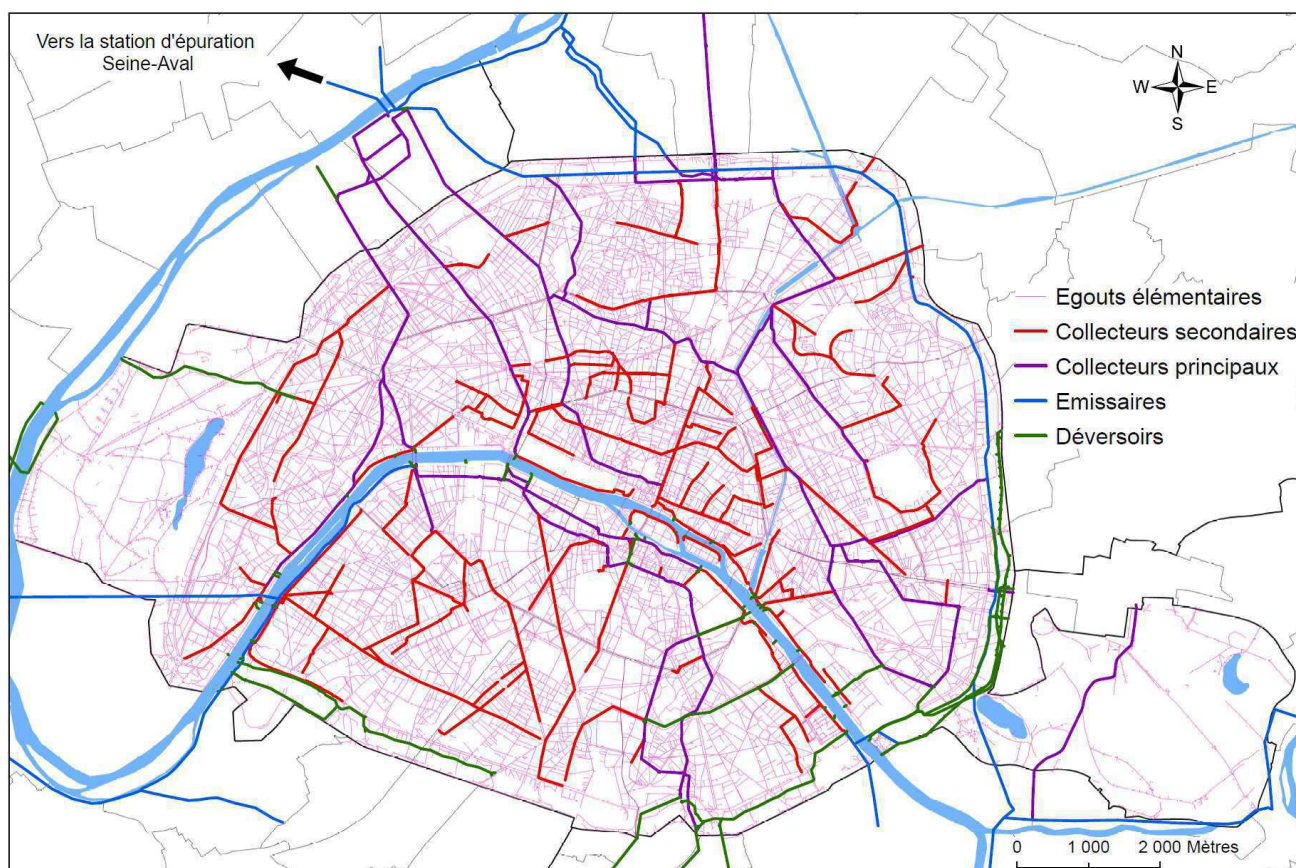


Figure 1. 37: Réseau d'égouts parisiens.

## → Le réseau d'eau potable

Le réseau d'eau potable, géré par Eau de Paris (Ville de Paris) depuis 2008, a délivré 196,6 millions de mètres cubes d'eau en 2011 (Le livre bleue, 2012) sur 2 000 km de conduites distribuées en égouts.

Cette eau provient de deux stations de pompages d'eau de surface ainsi que de 102 points de captages d'eau souterraine situés dans un rayon de 100 à 150 kilomètres de Paris (Annexe 1. 35). L'eau prélevée transite ensuite de façon gravitaire par un réseau de 470 kilomètres d'aqueducs avant de rejoindre cinq réservoirs (Montsouris - Annexe 1. 36, les Lilas - Annexe 1. 37, Ménilmontant, Saint-Cloud et l'Haÿ-les-Roses) et trois châteaux d'eau dans les quartiers hauts de Paris (Montmartre et Belleville). Il existe également cinq points de captage d'eau dans l'Albien (entre 500 et 700 mètres de profondeur) prélevant annuellement 120 000 mètres cubes d'eau par an pour alimenter des fontaines publiques.

Le Réseau d'eau potable parisien, est étroitement surveillé par un grand nombre de compteurs, ce qui limite considérablement les fuites estimées à environ 4% (Mairie de Paris, 2009).

## → Le réseau d'eau non potable

Le réseau d'eau non potable (ENP) (Figure 1. 38) est un réseau plus que centenaire (pose entre 1860 et 1920) construit à partir de la période haussmannienne. Il mesure 1819 km (APUR, 2010) à Paris et déborde dans l'ancien département de la Seine avec 350 km de conduites dans les Hauts-de-Seine, 425 km en Seine-Saint-Denis et 300 km dans le Val-de-Marne. A Paris 92% du réseau d'eau non potable est situé dans les galeries visitables du réseau d'assainissement. Les 8% restant correspondent à des portions implantées directement en terre.

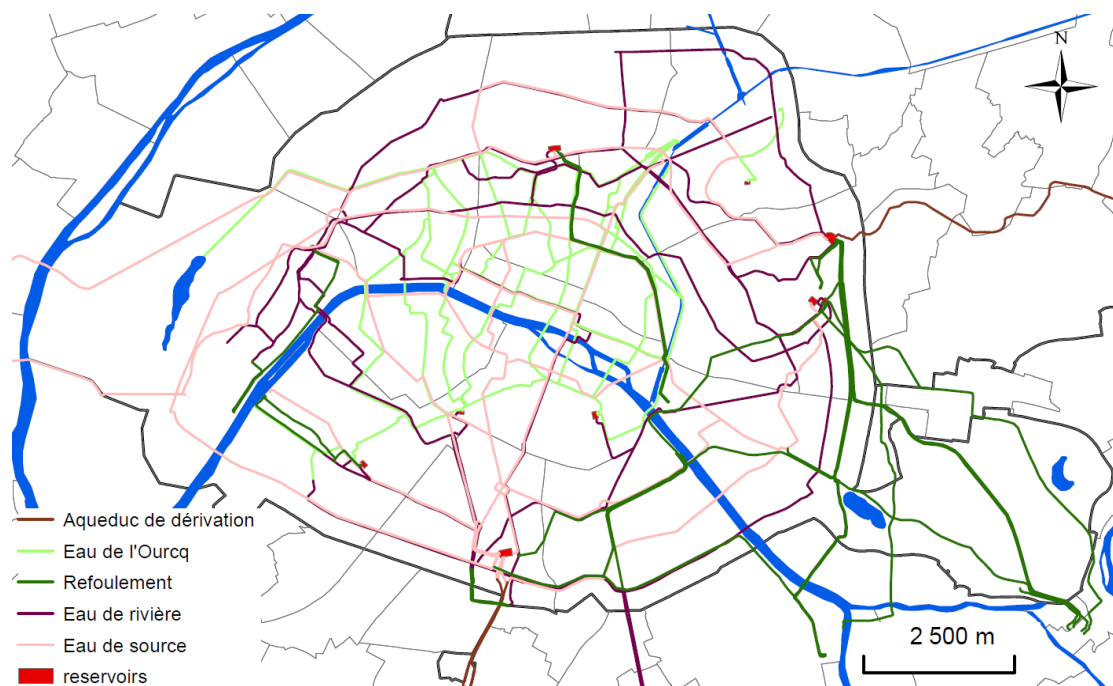


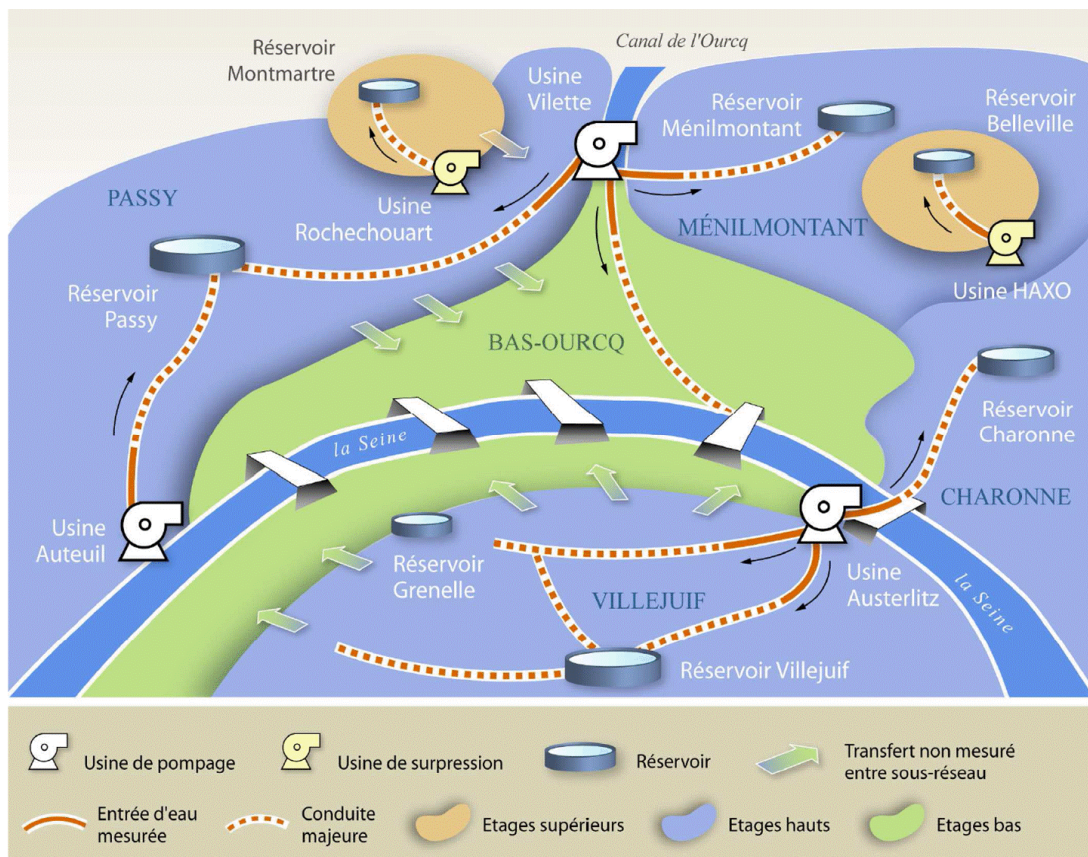
Figure 1. 38: Cartographie du réseau d'eau non potable.



L'eau du réseau d'ENP est prélevée dans la Seine au niveau des usines d'Austerlitz (15% de la production) et d'Auteuil (25 % de la production) ainsi que dans le Canal de l'Ourcq grâce à l'usine de la Villette (60 % de la production). L'eau est ensuite grossièrement traitée et rejoint les différents réservoirs, avant d'intégrer le réseau d'ENP (Figure 1. 39). Ces réservoirs qui présentent des fissurations (SAFEGE 2008) sont sujets à des fuites.

L'eau est utilisée à 2,2% par des usagers privés et les 97,8% restant correspondent à différents services de la Ville de Paris. Ce sont :

- Le Service Technique de l'eau et de l'Assainissement (STEA) pour les chasses d'égouts.
- Le Service Technique de la Propreté de Paris (STPP) qui assure le nettoyage des chaussées.
- La Direction des Espaces Verts et de l'Environnement (DEVE), pour l'arrosage de 51% des parcs et jardins intramuros de Paris.



**Figure 1. 39: Schéma de production et de distribution de l'eau non potable (SAFEGE).**

La production moyenne d'eau sur le réseau d'ENP est de 176 000 m<sup>3</sup>/j, alors que la consommation moyenne est de 74 000 m<sup>3</sup>/j. Certaines incertitudes sur les volumes demeurent, car sauf cas exceptionnel, les branchements du réseau ne disposent pas de compteurs. Seules les usines de pompages en sont équipées. Selon une étude de la Mairie de Paris portant sur le diagnostic du



réseau d'eau non potable, entre 363 et 489 km du réseau sont défectueux. Les pertes d'eau sont estimées par l'APUR à 58% ce qui représente un volume de 102 000 m<sup>3</sup>/j. Dans 92 % des cas cette eau rejoint directement les égouts, et les 8%, correspondant au réseau directement en terre, alimentent les nappes. Ce volume correspondrait à 8 160 m<sup>3</sup>/j.

Le STEA utilise en moyenne 3 370 m<sup>3</sup>/j, la DEVE 32 000 m<sup>3</sup>/j et les utilisateurs privés 1 630 m<sup>3</sup>/j. Quant à la STTP, elle a besoin de 37 000 m<sup>3</sup>/j pour nettoyer la voirie. Le coefficient de ruissellement des rues est de 0,9 (Bourrier, 1997), ce qui implique une recharge des nappes de 3 700 m<sup>3</sup>/j, alors que 33 300 m<sup>3</sup>/j retournent dans le réseau d'assainissement (Figure 1. 40).

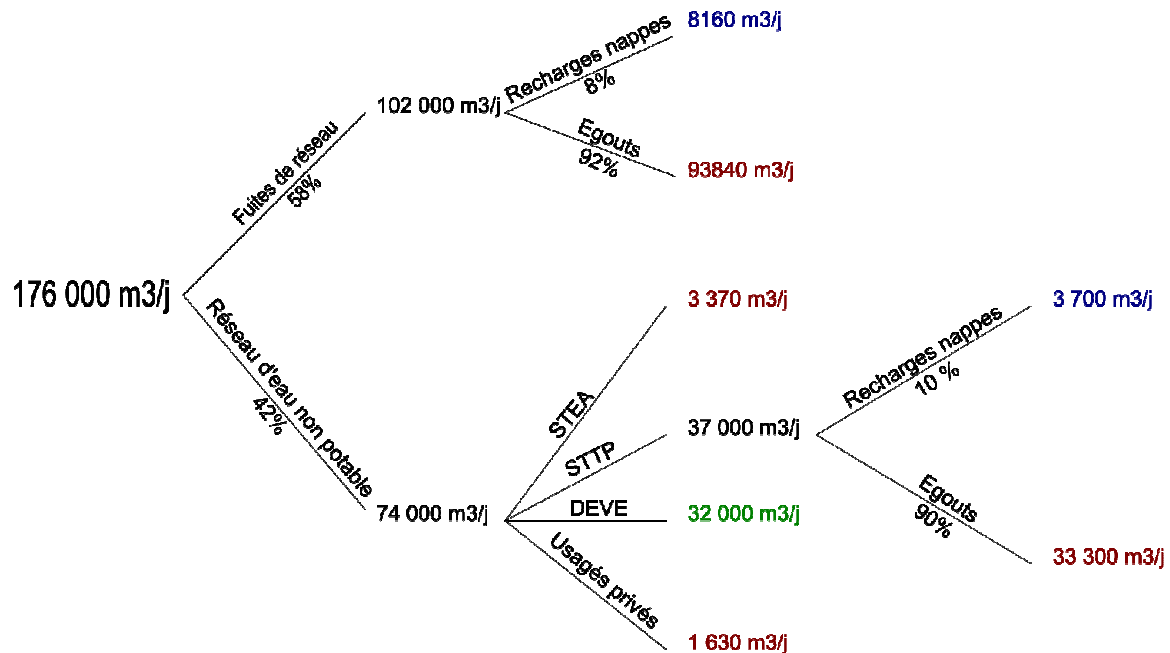


Figure 1. 40: Répartition des volumes d'eau du Réseau d'Eau Non Potable.

Au total, sur les 176 000 m<sup>3</sup>/j produit par le réseau d'ENP, 32 000 m<sup>3</sup>/j servent à l'alimentation en eau d'espaces verts, 11 860 m<sup>3</sup>/j rechargent les nappes et 130 510 retournent dans le réseau d'assainissement.

#### 2.2.9. Synthèse du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique parisien est l'archétype d'un milieu très fortement urbanisé (Figure 1. 41). Ses lacs et rivières sont complètement artificialisés et régulés et plus aucune source naturelle n'existe. Le composant, qui joue le rôle le plus important dans ce réseau hydrographique correspond au réseau d'assainissement. Tous ces éléments confèrent au réseau hydrographique un fonctionnement très particulier.

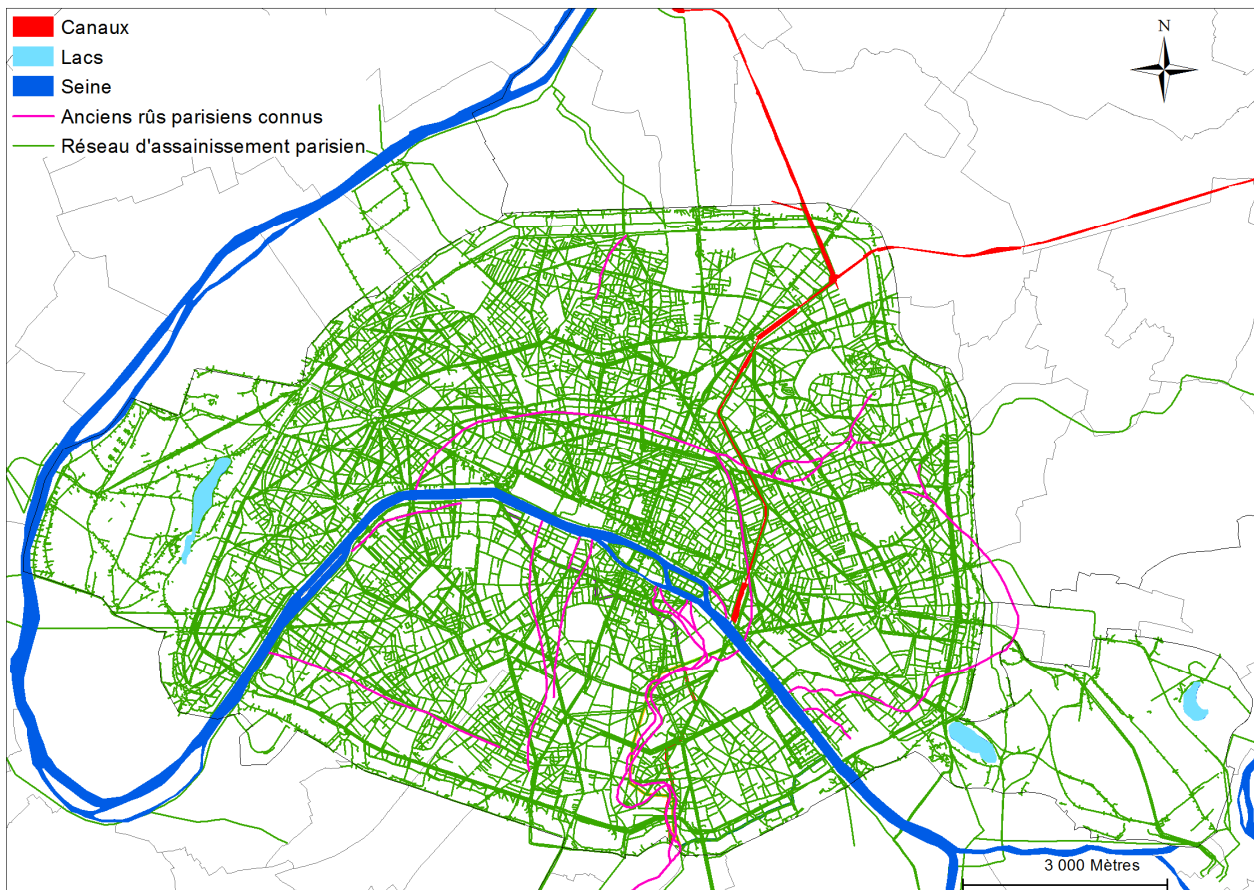


Figure 1. 41: Réseau hydrographique parisien.

### 2.3. Fonctionnement du système hydrogéologique parisien

Le système hydrogéologique parisien possède un fonctionnement spécifique qui est à mettre en relation avec le contexte géologique de la capitale, mais surtout avec l'urbanisation en surface et en profondeur du site.

#### 2.3.1. Recharges

→ Recharges sous l'effet de la pluie efficace

Les nappes sont alimentées par les eaux météoriques lorsque les formations aquifères sont affleurantes. A Paris ces infiltrations sont limitées car la surface de l'impluvium est fortement imperméabilisée sous l'effet de l'urbanisation. Certaines zones de recharge perdurent mais tendent à diminuer. Ainsi les terrains de sports ne sont plus perméables car majoritairement équipés de géomembranes, tous comme de nombreux parcs (jardin Flandre-Tanger-Maroc, jardin Atlantique, la promenade plantée ...). Les jardins publics se trouvant accolés à des immeubles sont même équipés de drains.

Le Tableau 1. 12 distingue les différents types d'occupations du sol parisien avec le terme « cours » qui englobe les cours d'immeubles, les voies ferrées, les chemins, les terrains de tennis... Les zones de recharges naturelles (espaces verts) représentent 17% de la surface de Paris et se trouvent essentiellement dans le Bois de Vincennes et le Bois de Boulogne. Outre ces bois, les espaces verts participant à la recharge des nappes correspondent à 5,6 % de la superficie de la capitale.

Superficie (m <sup>2</sup> )	Paris	Bois de Boulogne	Bois de Vincennes	Taux d'occupation de surface à Paris (%)	Coefficient de ruissellement (C)
Espaces verts	17 906 209	6 146 934	6 874 296	17	0,2
Seine	2 221 273	227 205	-	2,1	
Lacs	410 000	230 000	180 000	0,4	
Canaux	277 497	-	-	0,3	
Toitures	31 550 923	146 170	225 151	29,9	0,95
Routes	27 206 079	941 331	1 025 965	25,8	0,90
Cours	25 811 077	768 360	1 644 588	24,5	0,60
Total	105 383 058	8 460 000	9 950 000		

**Tableau 1. 12: Taux d'occupation des différents types de surfaces.**

En considérant les coefficients de ruissellement du Tableau 1. 12 pour les différentes surfaces du sol, nous calculons un taux d'imperméabilisation de 70% à Paris et en excluant les bois, il est de 77%. Ces taux reflètent le caractère particulier d'une grande métropole très fortement urbanisée en surface (Figure 1. 42) où il est parfois difficile de distinguer les espaces verts imperméabilisés. Ces valeurs ont été obtenues grâce à la formulation suivante :

$$S_a = (S_{\text{espaces verts}} * C_{\text{espaces verts}}) + (S_{\text{toitures}} * C_{\text{toitures}}) + (S_{\text{routes}} * C_{\text{routes}}) + (S_{\text{cours}} * C_{\text{cours}})$$

$$S_{a \text{ Paris}} = 73\,526\,736 \quad \text{et} \quad S_{a \text{ Paris sans les Bois}} = 67\,351\,400$$

$$T_i = \frac{S_{a \text{ Paris}} * 100}{\text{Surface de Paris}} \quad T_{i \text{ Paris}} = 70 \% \quad \text{et} \quad T_{i \text{ Paris sans les bois}} = 77\%$$

Avec :  $S_a$  = Surface participant au ruissellement ;  $T_i$  = Taux d'imperméabilisation de Paris et

$C$  = Coefficient de ruissellement

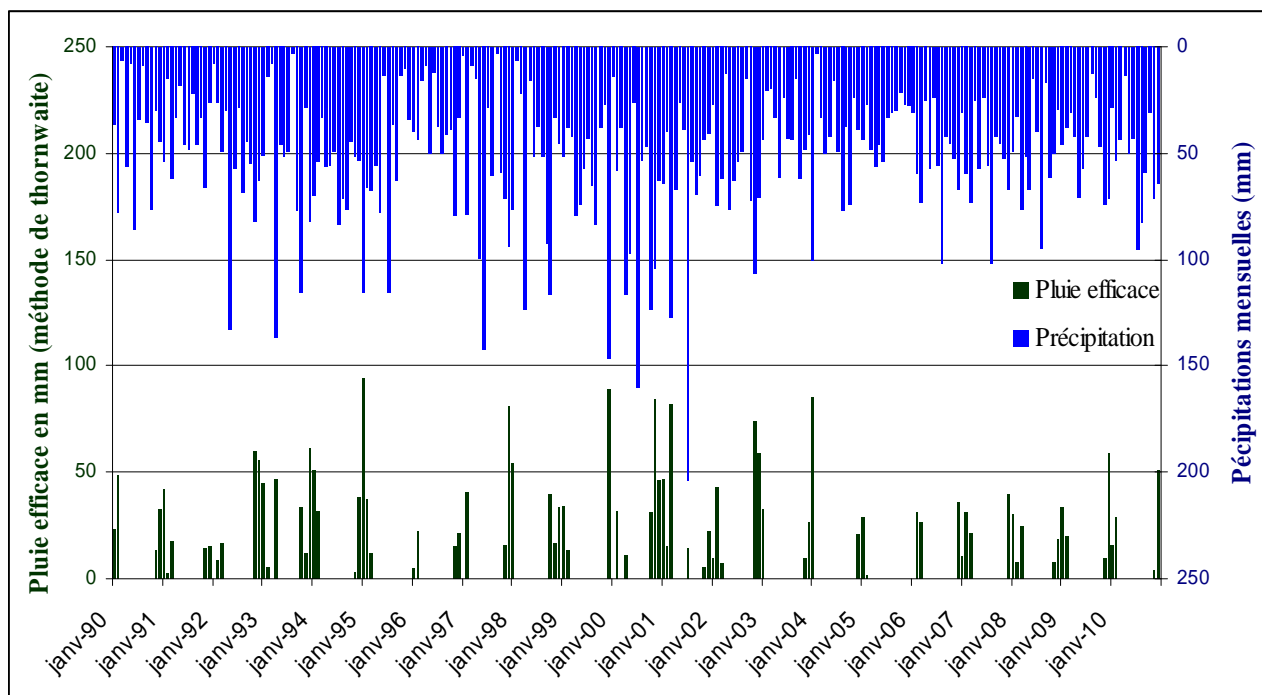




Figure 1. 42: Occupation surfacique de Paris.

Selon une étude menée en 1986 par Kessler et Chambraud (Annexe 1. 38), nous constatons, grâce à une vingtaine de points de mesures répartis sur l'ensemble de Paris, que la pluviométrie présente une légère hétérogénéité avec des valeurs comprises entre 540 mm/an à Montmartre et 630 mm/an au Parc de Bagatelle dans le Bois de Boulogne. Les mesures effectuées par l'observatoire météorologique implanté en 1947 au parc Montsouris, nous donne une valeur moyenne des hauteurs de précipitations de 613 mm/an mesurés entre 1990 et 2010. Quant à la pluie efficace moyenne calculée, grâce à la méthode de Thornwaite entre 1990 et 2010 (Figure 1. 43), elle est de 123 mm/an (Annexe 1. 39).

Comme la surface d'espaces verts à Paris est de 17,9 km<sup>2</sup>, le volume moyen de pluie efficace est de 2,2 millions de m<sup>3</sup>/an et de 0,6 million de m<sup>3</sup>/an lorsque nous n'intégrons pas les bois de Boulogne et de Vincennes.



**Figure 1. 43: Précipitations et pluie efficace à Paris entre 1990 et 2010 (source Météo France).**

Paris est occupée en surface à plus de 80% par des toitures, des voies et des cours. Il est donc important de connaître le volume d'eau météorique qui transite par ces objets avant de parvenir à recharger les nappes. En prenant en compte le ruissellement et l'évaporation, nous trouvons à Paris, un volume d'eau pluviale alimentant les nappes et ayant été intercepté par les cours et les routes, d'environ 5,6 millions de m<sup>3</sup>/an (Tableau 1. 13). Les différents pourcentages de ruissellement, d'évaporation et d'infiltration ont été estimés d'après les travaux de Chocat et al. 1982 (Annexe 1. 40).

	Ruissellement (%)	Volume d'eau pluviale ruisselant (m <sup>3</sup> /an)	Evaporation (%)	Volume d'eau pluviale s'évaporant (m <sup>3</sup> /an)	Infiltration (%)	volume d'eau pluviale rechargeant les nappes (m <sup>3</sup> /an)
Toitures	95	18 373 680	5	967 036	-	-
Routes	90	15 009 594	5	833 866	5	833 866
Cours	60	9 493 314	10	1 582 219	30	4 746 657
Total		42 876 588		3 383 121		5 580 523

**Tableau 1. 13: Volumes d'eau pluviale rechargeant les nappes selon les différents types d'occupations du sol.**

Le volume total de la pluie qui recharge les nappes à Paris est de 7,8 millions de m<sup>3</sup>/an et de 5,7 millions de m<sup>3</sup>/an d'eau lorsque nous ne prenons pas en compte les bois. Les contributions majeures proviennent des infiltrations d'eau météorique dans les cours, et de pluie efficace dans les bois de Boulogne et Vincennes.

→ Recharges par la Seine

En régime naturel et sous climat tempéré, la Seine devrait comme au début du siècle dernier être alimentée par la nappe des alluvions anciennes. Depuis plus d'un siècle, le processus s'est inversé, et plus particulièrement au centre de Paris et en rive droite du fleuve. En effet, d'intenses pompages créent une forte dépression provoquant une diminution des niveaux piézométriques qui deviennent inférieurs au niveau de la Seine.

La structure du lit de la Seine ne limite pas complètement les échanges avec les nappes (Figure 1. 44). L'eau y circule en employant trois chemins différents:

- Le fond du lit de la Seine, dragué, occupé généralement par des alluvions anciennes, présente une perméabilité favorisant les circulations d'eau.
- Les quais n'étant pas étanches, l'eau y circule sans grande difficulté (avec une réduction du débit estimé à au moins 50%) et alimentent par infiltration les nappes en périphérie.
- Lors des crues hivernales, la cote de la Seine remonte brusquement, et dans certains cas, submerge les quais. Cela engendre des inondations des berges qui sont théoriquement étanches.

Les niveaux relatifs à la Seine et aux nappes font que le fleuve à Paris est en majorité infiltrant avec quelques secteurs drainants comme au niveau du Jardin du Trocadéro ou du Parc Bagatelle. Diffre a estimé en 1969, époque où les nappes étaient particulièrement basses par rapport à de la Seine, que la réalimentation des nappes par la Seine dans Paris était de 0,6 m<sup>3</sup>/s soit 18,9 millions de mètres cubes par an. Les apports de la Seine sont donc loin d'être négligeables par rapport aux recharges de la pluie efficace.

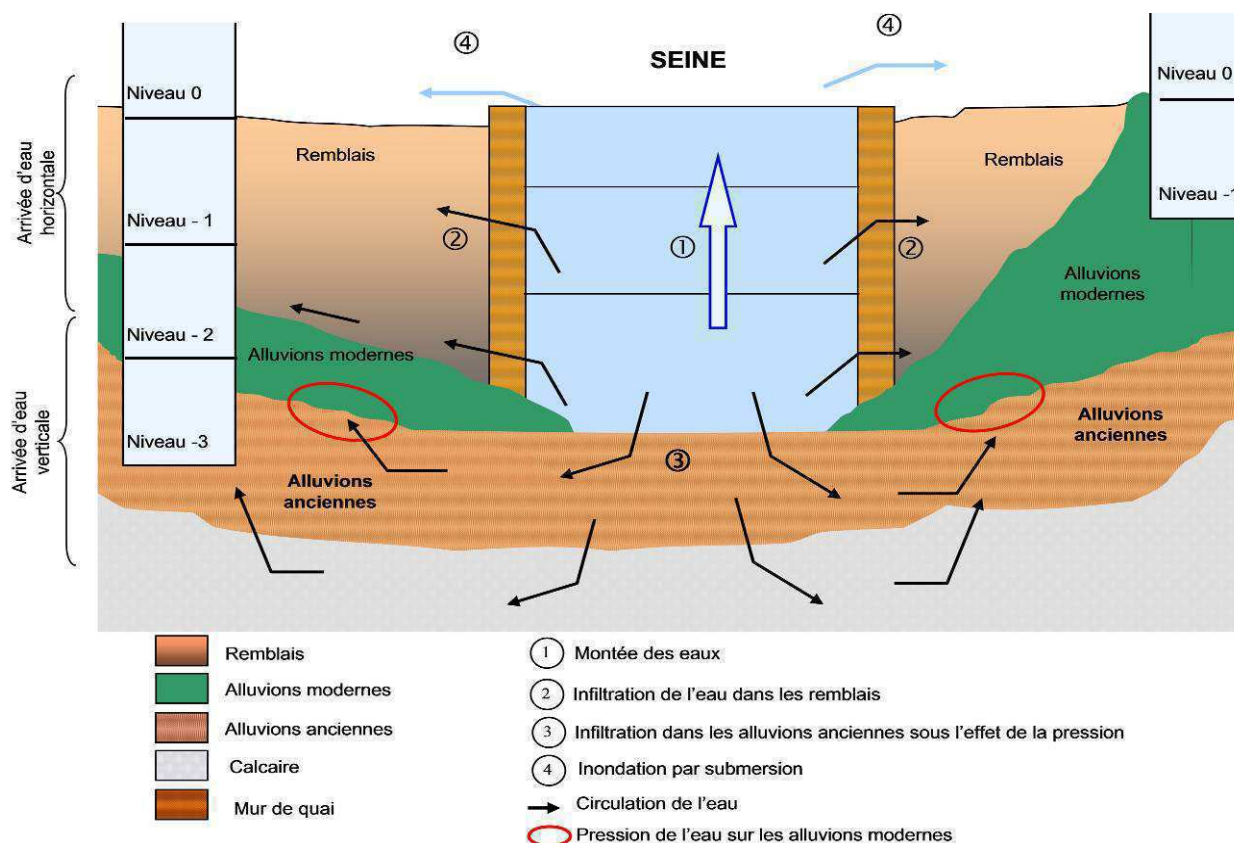


Figure 1. 44: Schéma de l'alimentation de nappes par la Seine dans le cas d'une crue (source IGC).

Durant les crues hivernales, les nappes à proximité de la Seine enregistrent des variations piézométriques. Par exemple en janvier 2004 (Le Parisien - Annexe 1. 41), deux piézomètres implantés l'un dans la nappe des alluvions anciennes (TG3) et l'autre dans la nappe du Lutétien (TG1) ont enregistré une petite crue se traduisant par une élévation rapide de leur niveau à proximité du Port de la Gare dans le 13<sup>e</sup> arrondissement (Figure 1. 45).

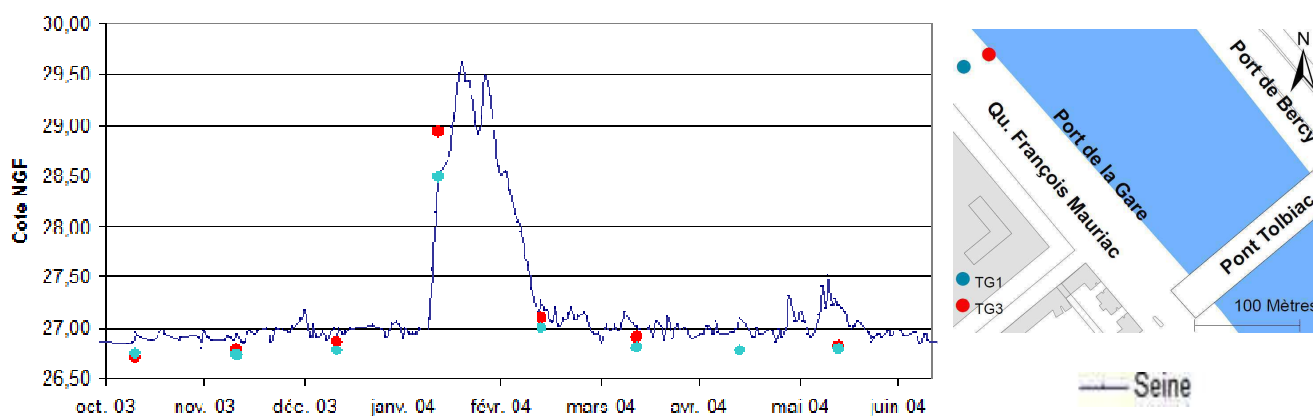


Figure 1. 45: Effets du débordement de la Seine du 24 janvier 2004 sur les nappes.

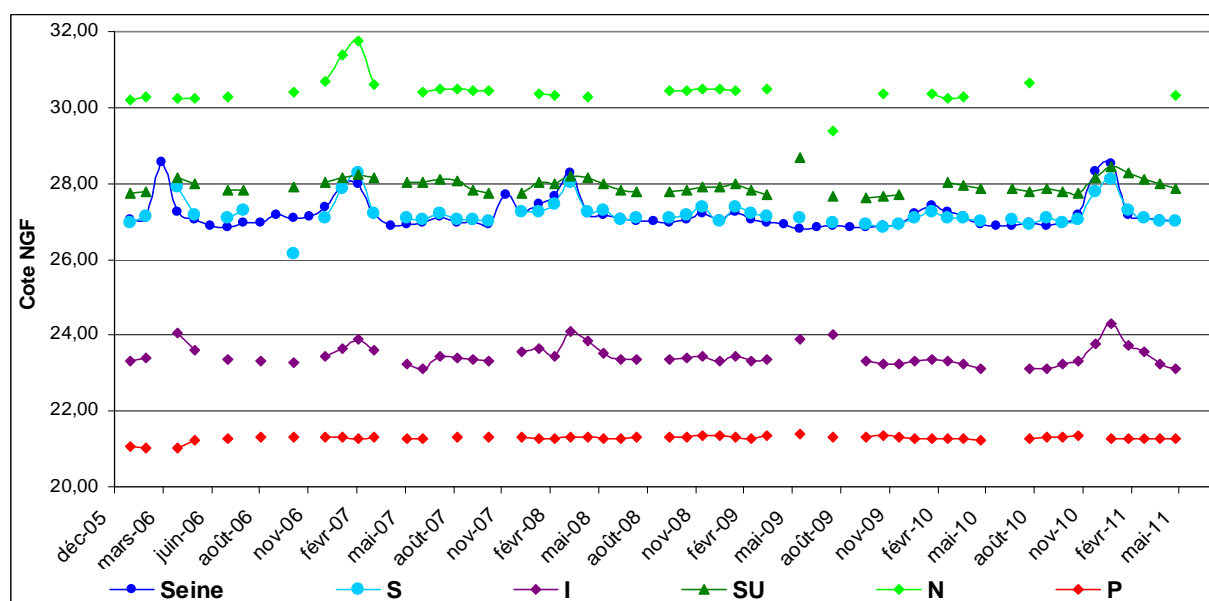


Suite à l'étude comparative des variations du niveau de la Seine avec les chroniques de 268 piézomètres (160 piézomètres de l'IGC et 108 piézomètres de la RATP) implantés dans Paris et dans les villes limitrophes, nous avons observé des similitudes entre les fluctuations du fleuve et l'évolution de la cote piézométrique de la nappe phréatique (les premières nappes). Ce phénomène est également décrit dans une étude de Zinou Zéglil en 2011.

Les 268 piézomètres utilisés furent répartis en cinq classes déterminées en fonction du degré de relation avec les variations du niveau de la Seine. Ces différentes classes sont présentées dans le Tableau 1. 14, illustrées dans la Figure 1. 46 et localisée sur la Figure 1. 47

Types de relations entre l'allure de la courbe piézométrique d'un piézomètre et les variations du niveau de la Seine	Nombre de piézomètres	Symboles	Types d'alimentations de la nappe phréatique vis-à-vis de la Seine
Courbe piézométrique fortement corrélables au niveau de la Seine	76	S	Alimentation par la Seine
Courbe piézométrique inférieure au niveau de la Seine mais présentant les mêmes fluctuations	16	I	Alimentation par la Seine associée à la présence de pompages
Courbe piézométrique supérieure au niveau de la Seine mais présentant des similitudes lors de crues	9	SU	Drainage de la nappe par la Seine excepté durant les épisodes de crues
Courbe piézométrique ne présentant pas de corrélation avec les variations du niveau de la Seine	140	N	Alimentation indépendante de la Seine
Courbe piézométrique présentant de faibles variations	27	P	Présence de nombreux pompages ne permettant pas de définir le type d'alimentation

**Tableau 1. 14: Tableau présentant les différents types de relations entre l'allure des courbes piézométriques de 268 piézomètres et les variations du niveau de la Seine.**

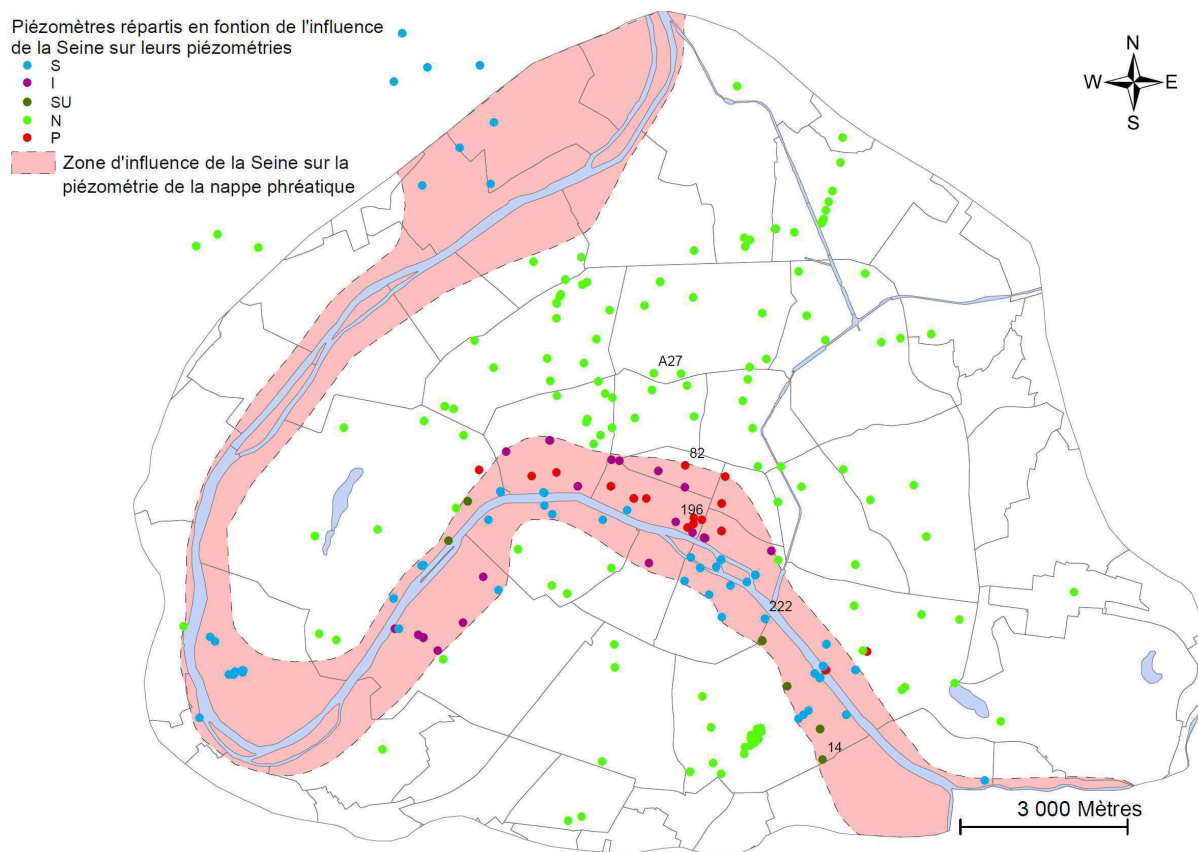


**Figure 1. 46: Courbes piézométriques de 5 piézomètres associés à la courbe du niveau de la Seine entre janvier 2006 et mai 2011 (données IGC)**

Avec le piézomètre 222 pour le type S, le piézomètre 196 pour le type I, le piézomètre 14 pour le type SU, le piézomètre A27 pour le type N et le piézomètre 82 pour le type P.



Cette analyse piézométrique nous a permis de délimiter une zone d'alimentation de la nappe phréatique par la Seine (Figure 1. 47) qui se rapproche géographiquement du lit majeur du fleuve. Nous noterons que le manque de données piézométriques entre la boucle de Boulogne et la boucle de Gennevilliers ne nous permet pas de délimiter précisément la zone d'influence de la Seine dans ce secteur.



Chaque canalisation se dégrade au fil du temps, et finit inexorablement par avoir des fuites. Leurs origines sont extrêmement variables et peuvent provenir du réseau privé (en particulier au niveau du raccordement), du réseau d'assainissement directement fuyard, du réseau de chauffage urbain qui peut serpenter directement en terre (Annexe 1. 42 et Annexe 1. 43), de canaux de navigation ou dans des cas plus exceptionnels de lacs artificiels. Ces pertes d'eau contribuent à l'alimentation directe des nappes.

Nous avons vu qu'à Paris les pertes correspondent à environ 10 % pour le réseau d'assainissement qui collecte la quasi-totalité des fuites des différents réseaux, et 5% pour le réseau d'eau non potable lorsqu'il est implanté directement en terre. Ces fuites correspondent à un volume annuel compris entre 33 et 36 millions de mètres cubes d'eau; soit l'équivalent de plus de quatre années de « recharge naturelle » ; recharge s'effectuant principalement par infiltrations à travers les cours.

### → Recharges par drainance descendante

Dans le contexte parisien, lorsque deux nappes reposent l'une sur l'autre sans formation imperméable pour les séparer, la nappe du bas est généralement alimentée par celle du dessus par drainance descendante. Ces circulations d'eau ne sont vraisemblablement pas intenses, car la perméabilité horizontale est bien supérieure à la perméabilité verticale. Certaines zones, présentant des karts, des dissolutions de gypse, des fontis, des anciens puits, des piézomètres crépinés sur plusieurs nappes ou des sondages mal ou pas rebouchés recoupant plusieurs nappes, font exception à cette règle. Par ailleurs, il semblerait que le mur de la nappe du Bartonien soit discontinu, ce qui favorise des communications locales avec la nappe sus-jacente du Lutétien. Ces débits ne sont pas identifiables à l'heure actuelle.

Aux pieds des buttes témoins, de nombreux sondages ont révélé l'existence d'éboulis de pentes très hétérogènes. Ces horizons favorisent les circulations de lames d'eau provenant « des hauteurs » vers les nappes sous-jacentes. Ces débits ne sont pas quantifiables.

### → Recharges par des apports latéraux

Les nappes présentes à Paris ont toutes, excepté au niveau de la butte Montmartre, une étendue géographique régionale. En banlieue, l'alimentation naturelle des nappes par la pluie est bien plus importante ce qui favorise leur recharge. Le sens général d'écoulement des nappes se fait en faveur de la Fosse Saint-Denis, en favorisant les apports latéraux en provenance de la périphérie parisienne. Les volumes mis en jeu ne sont pas connus.

#### 2.3.2. Prélèvements

A Paris, il existe de nombreux prélèvements en nappe motivés par la géothermie de très basse température (systèmes de climatisation ou de chauffage), par le drainage d'ouvrages (RATP, parkings, centres commerciaux ...) et par différents pompages d'assèchement de chantiers de construction.

### → Pompages et drainages liés à la protection d'ouvrages

A Paris, le manque d'espace en surface a engendré la création d'édifices souterrains (métro, RER, parkings, centres commerciaux, musées...) de plus en plus profonds. Ces structures peuvent baigner dans les formations aquifères. Afin d'éviter des surpressions de nappes au niveau du radier, des ennoissements ou tout simplement des venues d'eau résultant d'un mauvais étanchement, ou d'une augmentation des niveaux piézométriques, la mise en place de systèmes drainants ou de pompages permanents est indispensable. Cette eau est prélevée dans les nappes puis rejetée dans les égouts ou directement dans la Seine.

## → Pompages pour les installations géothermiques

Depuis plus d'un siècle, comme ce fut le cas du BHV ou de l'ancienne Samaritaine jusqu'à sa fermeture en 2005, de nombreux bâtiments parisiens utilisent l'eau des nappes en source chaude ou froide afin de climatiser ou réchauffer leurs locaux. Les prélèvements dans les nappes yprésiennes, lutétienne et bartonienne ne sont pas contraints par une réglementation à Paris sauf dans les zones de dissolution de gypse. Pour cette raison, il a été recommandé par différents bureaux d'études, durant de nombreuses années de n'effectuer que des forages de production et de réinjecter directement en égouts (Figure 1. 48). Certains quartiers parisiens, comme les quatre premiers arrondissements, possèdent depuis longtemps un nombre important de ce type d'aménagement.



**Figure 1. 48: Rejet d'eau d'exhaure en égouts (source: Ville de Paris)**

## → Pompages liés à des chantiers de construction

Certains ouvrages souterrains nécessitent des pompages temporaires lors de leur construction, et surtout avant l'étanchement de leurs fondations. Les volumes peuvent être considérables. Ainsi lors de la construction de la gare Haussmann-Saint-Lazare du RER E initialement station Condorcet, 30 millions de mètres cubes d'eau, avec un débit maximum de 850 m<sup>3</sup>/h répartis sur 14 points (Morelli, 2000), ont été pompés entre juin 1994 et novembre 1998

## → Pompages pour des usages domestiques

L'eau domestique définie par l'article R214-5 du code de l'environnement, correspond à de l'eau destinée à un usage alimentaire ou liée à l'hygiène, comme la préparation d'aliments, le lavage du linge, l'alimentation des toilettes, l'arrosage de jardins... Les pompages d'eau pour cet usage sont relativement rares, mais peuvent exister surtout en banlieue.

### → Volumes prélevés

Selon le décret n°94-469 du 3 juin 1994 relatif à la collecte et au traitement des eaux usées mentionnées aux articles L. 372-1-1 et L. 372-3 du code des communes, le rejet des eaux d'exhaure (« eaux souterraines issues de pompages ou drainages ») dans le réseau d'assainissement est interdit, sauf autorisation spécifique qui ne peut être délivrée qu'en cas d'impossibilité technique de rejet direct dans le milieu naturel. A Paris, les nappes du Tertiaire sont considérées d'un point de vue législatif comme étant superficielles, non différenciées et dépendante de la Seine. Le rejet en milieu naturel peut donc s'effectuer soit directement dans le fleuve ou dans ces nappes. Faute de pouvoir faire passer plusieurs centaines de canalisations correspondant à chaque point de prélèvement dans le réseau d'égouts, le rejet en Seine ne peut être effectué qu'à proximité du fleuve (parking Opéra Meyerbeer, le futur « nouveau Beaugrenelle », station de métro Saint Michel, ...). Lorsque les sites de prélèvements se trouvent en zone de dissolution de gypse, l'eau n'est pas théoriquement réinjectée dans le milieu naturel, car cela risquerait d'engendrer des dégradations du sous-sol avec l'apparition de vides. On peut donc penser que, dans ces secteurs, la majorité des rejets se fait directement dans le réseau d'assainissement.

L'estimation des volumes prélevés est difficile à quantifier, car il n'existe pas de structure administrative chargée de les recenser de manière exhaustive. Concernant l'eau prélevée dans les nappes, il existe une législation qui fait appel au code minier, au code de la santé publique, au code de l'environnement et à la loi sur l'eau. Nous ne nous intéresserons qu'aux textes relatifs aux nappes dites « d'accompagnement d'un cours d'eau ».

Selon le décret n° 93-742 du 29 mars 1993 relatif aux procédures d'autorisation et de déclaration prévues par l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, un forage géothermique doit être simplement déclaré si les prélèvements y sont inférieurs ou égal à 80 m<sup>3</sup>/h et est soumis à autorisation lorsqu'ils sont supérieurs. L'organisme chargé de l'instruction des dossiers est le STIIC (Service Technique Interdépartemental d'Inspection des Installations Classées) à Paris; dans les départements limitrophes, il s'agit de la DREAL d'Ile-de-France. Le STIIC ne contrôle pas les volumes, et généralement les pompes à chaleurs ne possèdent pas de compteur.

Pour les puits ou forages réalisés à des fins d'usage domestique, même pour des volumes d'eau inférieur ou égal à 1000 m<sup>3</sup>/an, chaque propriétaire public ou privé, doit (selon le décret n° 2008-652 du 2 juillet 2008 relatif à la déclaration des dispositifs de prélèvement, puits ou forages réalisés à des fins d'usage domestique de l'eau et à leur contrôle ainsi qu'à celui des installations privatives de distribution d'eau potable) déclarer les volumes prélevés auprès des collectivités territoriales. Si la déclaration n'est pas faite, aucune sanction n'est prévue dans la réglementation. Au vu des différents textes législatifs et du peu de données existantes sur les prélèvements d'eau, nous avons tenté d'estimer ces volumes en recoupant différentes sources.

Jusqu'en 2007 compris, l'Agence de Bassin Seine Normandie se chargeait de répertorier sans taxer les différents préleveurs d'eau des nappes du Tertiaire et le la Craie. Par la suite, la SAP (Section de l'Assainissement de Paris) imposa une redevance de l'ordre de 13 centimes par mètre cube d'eau rejeté en égouts et en les assimilant à des rejets industriels. Le règlement d'assainissement de la Ville de Paris autorise les rejets d'eau d'exhaure dans son réseau en les assimilant à des rejets industriels qui seront par la suite traités à la station d'épuration Seine-Aval (anciennement Achères). Ces eaux d'exhaure participent au bon fonctionnement de l'usine qui a besoin de ces eaux généralement « plus propres » que les autres rejets industriels afin de diluer (surtout en période d'étiage) certains polluants normalement interdit comme les produits organochlorés (pressings), le cyanure (bijoutiers), les hydrocarbures (fin de cuves)... Cependant la proportion d'eau de dilution ne peut être trop importante sans risquer de perturber le cycle de vie des bactéries contenues dans les boues activées de la station d'épuration. Pour résumer, l'usine Seine-Aval a besoin des eaux d'exhaure mais dans des proportions « raisonnables » afin de fonctionner correctement.

Les prélèvements sauvages non déclarés résultent principalement de besoins énergétiques (climatisation, pompe à chaleur ...), d'épuisements de fouilles et d'exhaure permanent pour la protection d'ouvrages. Beaucoup de prélèvements se font à « l'insu » des propriétaires des infrastructures, qui ne savent pas par exemple que leur bâtiment draine de l'eau depuis 40 ans. Ces prélèvements sauvages tendent à augmenter avec le développement de la géothermie.

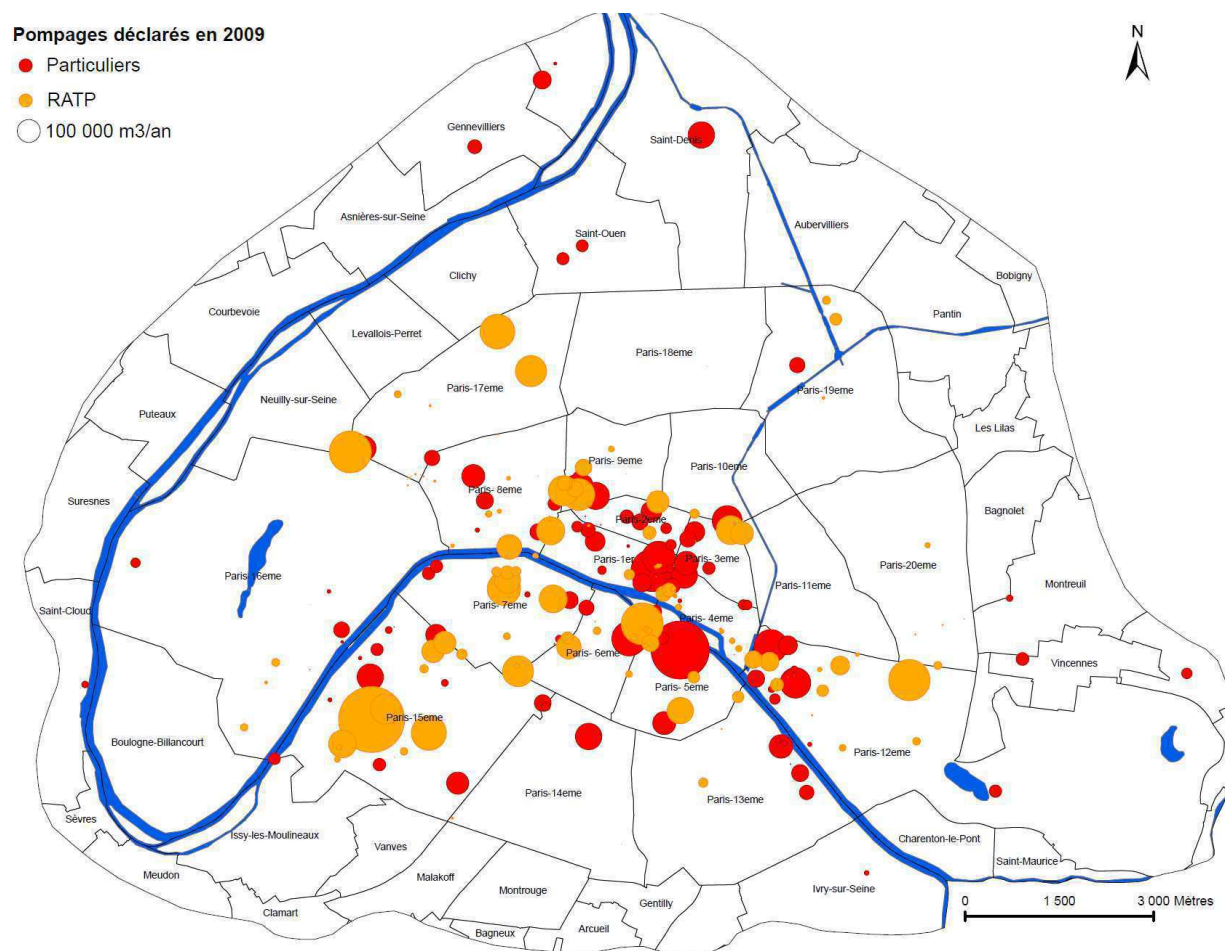
Les préleveurs d'eau des nappes éocènes et campanienne qui déclaraient leurs volumes annuels à l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) jusqu'en 2007 inclus, ne sont pas les mêmes que les préleveurs déclarants de la SAP en 2009. Afin d'identifier les volumes d'eau prélevés en nappes, nous avons additionné les données 2007 de l'Agence de l'eau Seine-Normandie avec les données 2009 de la SAP. Ces volumes totaux reportés dans le Tableau 1. 15, représentent 11,9 millions de m<sup>3</sup>/an à Paris et 12,3 millions dans la zone d'étude.

	Volumes en m <sup>3</sup> /an
Volumes déclarés à l'AESN à Paris en 2007 par des privés	706 215
Volumes déclarés à l'AESN sur la zone d'étude (hors Paris) en 2007	418 376
Volumes déclarés à la SAP par des privés en 2009	4 807 565
Volumes déclarés à la SAP par la RATP en 2009	6 346 136
<b>Total</b>	<b>12 278 292</b>

**Tableau 1. 15: Volumes d'eau prélevés et déclarés dans la zone d'étude en 2007 (données AESN) et en 2009 (données SAP).**

En 2009, 11,1 millions de mètres cubes prélevés dans les nappes affleurantes à Paris furent déclarés à la SAP. Ce volume correspond à 6,3 millions de mètres cubes pour la RATP (en prenant en compte les volumes rejetés directement dans la Seine) et 4,8 millions pour les particuliers. Nous noterons, que ces derniers font eux-mêmes leurs relevés sur des compteurs qui ne sont pas toujours actifs. De nombreuses lacunes de données sur les déclarations existent, car la SAP estime que le volume réel d'eau d'exhaure est compris entre 20 et 30 millions de m<sup>3</sup>/an, avec un volume vraisemblablement plus proche de 30 millions que de 20 millions. Il semblerait que la RATP déclare correctement ses prélèvements ce qui n'est pas le cas de cinq préleveurs sur six dans le domaine privé.

Les volumes d'eau prélevés et identifiés sont répartis en 241 points de captages à Paris et 16 en banlieue. Bien qu'incomplète, faute de déclarations, la Figure 1. 49 nous donne une idée de la répartition géographique des pompages sur la zone d'étude. Nous pouvons y voir qu'ils sont majoritairement situés en bordure de Seine et en particulier dans les quatre premiers arrondissements et dans le 15<sup>e</sup>, zone où les niveaux piézométriques sont effectivement les plus bas.



**Figure 1. 49: Prélèvements d'eau déclarés dans les nappes éocènes et dans la nappe de la Craie à Paris et en proche banlieue.**

## 2.4. Situation piézométrique

Depuis plus d'un siècle, la situation démographique et urbaine parisienne s'est radicalement modifiée. Tous ces changements ont eu une influence importante sur l'évolution des niveaux piézométriques.

### 2.4.1. Le passé

→ Niveau « naturel » (1858)

La première carte hydrogéologique de Paris, considérée comme représentative du niveau naturel des nappes phréatiques, fut réalisée en 1862, pour l'année 1858 par Achille Delesse (Figure 1. 50). Delesse a identifié trois nappes bien distinctes dans Paris. La première appelée « Nappe au dessus des Marnes Vertes » correspond à la nappe que nous nommons nappe du Travertin de Brie – Sables de Fontainebleau, la seconde appelée « nappe sur l'Argile Plastique » peut être associée à la nappe du Lutétien en incluant la nappe de l'Yprésien supérieur lorsqu'elle est présente. La troisième, qualifiée de « nappe d'infiltration », regroupe les premières nappes rencontrées suivant la formation affleurantes: la nappe des alluvions anciennes, la nappe du Bartonien, la nappe du Lutétien, les nappes de l'Yprésien et la nappe de la Craie de Meudon.

Sur la carte de Delesse, nous pouvons voir un rapport « normal » entre la Seine et la plaine alluviale, avec la nappe des alluvions qui alimente le fleuve. Les niveaux piézométriques des nappes perchées localisées sur les buttes témoins sont bien distincts des autres niveaux piézométriques. Les recharges se font principalement au niveau des reliefs et du bois de Boulogne. Il existe néanmoins deux dépressions piézométriques situées respectivement au niveau de la boucle de Boulogne et de la boucle de Gennevilliers qui pourraient déjà traduire l'influence de pompages.

→ Evolution jusqu'aux années 1970

Entre 1858 et 1969, date de la publication de la carte piézométrique de 1965 (Figure 1. 51) réalisée par Philippe Diffre, aucune étude portant sur les nappes de l'Eocène et de la Craie ne fut réalisée. On découvrit alors d'importantes modifications piézométriques par rapport à la carte de Delesse.

Plusieurs causes sont à l'origine de cette situation. La première est l'accroissement démographique de la population parisienne qui passe d'1,7 million en 1862 à 2,6 millions en 1968 en impliquant une plus grande consommation d'eau. La seconde cause correspond au développement industriel qui a favorisé l'implantation massive d'entreprises (papeteries, usines de voitures, abattoirs...), prélevant des volumes d'eau important dans les nappes. Dans un troisième cas, la création et l'exploitation de grands édifices comme le réseau métropolitain parisien (création dès 1900), ou la Maison de la Radio en 1963, a nécessité et nécessite toujours des volumes d'eau d'exhaure non négligeables. Dans un quatrième cas, la réduction des zones d'infiltration d'eau

pluviale avec le bitumage, le pavage de presque toutes les rues et l'imperméabilisation d'espaces de loisirs (centres sportifs, squares ...) a joué un grand rôle. Il existe également d'autres facteurs comme l'accroissement de la pluviométrie (Annexe 1. 44), le nettoyage des rues plus fréquent, l'arrosage des jardins... La combinaison de tous ces facteurs positifs ou négatifs a entraîné, au final, une diminution générale des niveaux piézométriques. Ceci a incité au développement d'ouvrages souterrains qui se trouvaient ainsi plus facilement hors d'eau.

La carte piézométrique de Diffre présente au niveau de la rive droite (hormis le Bois de Boulogne), une inversion du sens d'écoulement impliquant une alimentation de la nappe par la Seine. Quant à la rive gauche, du fait de la profondeur plus importante de l'eau, la nappe a été moins exploitée. Cela explique une diminution du niveau piézométrique moins importante.

En comparant les cartes de Delesse et Diffre (Figure 1. 52), nous constatons des différences importantes de niveaux piézométriques principalement en rive droite de la Seine et en particulier dans le quartier de l'Opéra et dans les 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup>, 8<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> arrondissements. Cette zone présente une diminution du niveau piézométrique de la nappe pouvant atteindre 16 mètres.



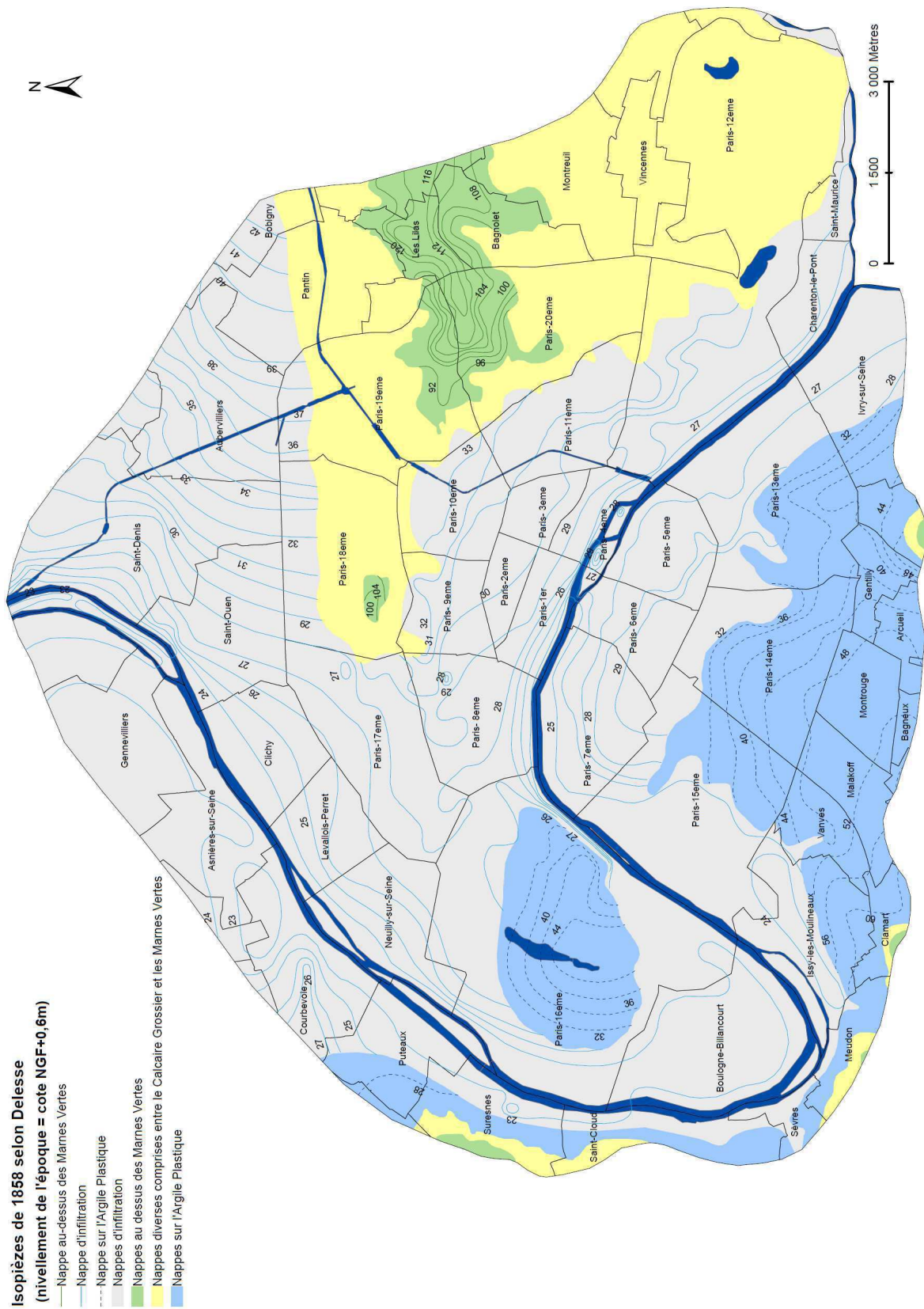


Figure 1. 50: Carte piézométrique de Delesse en 1858.

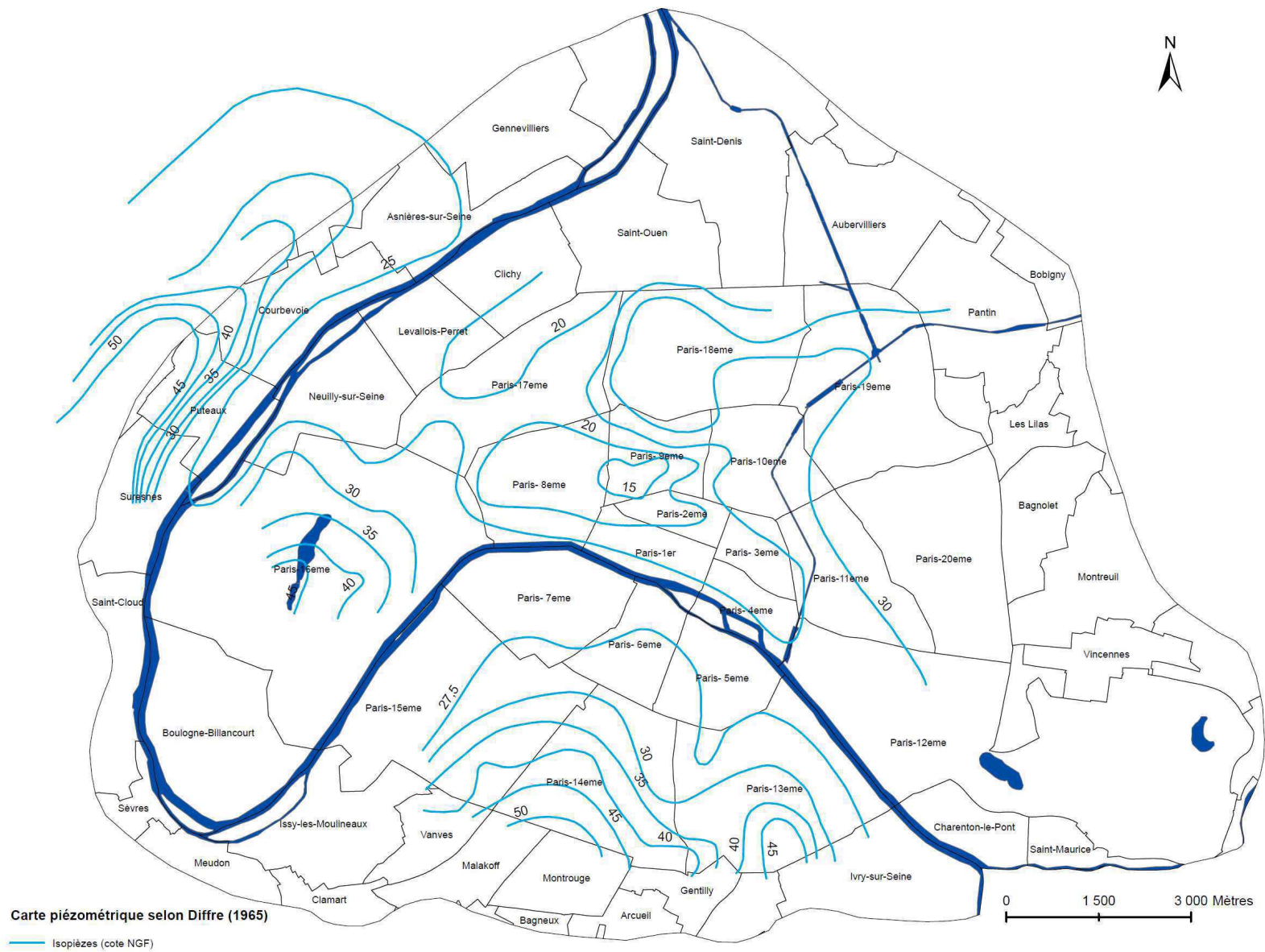
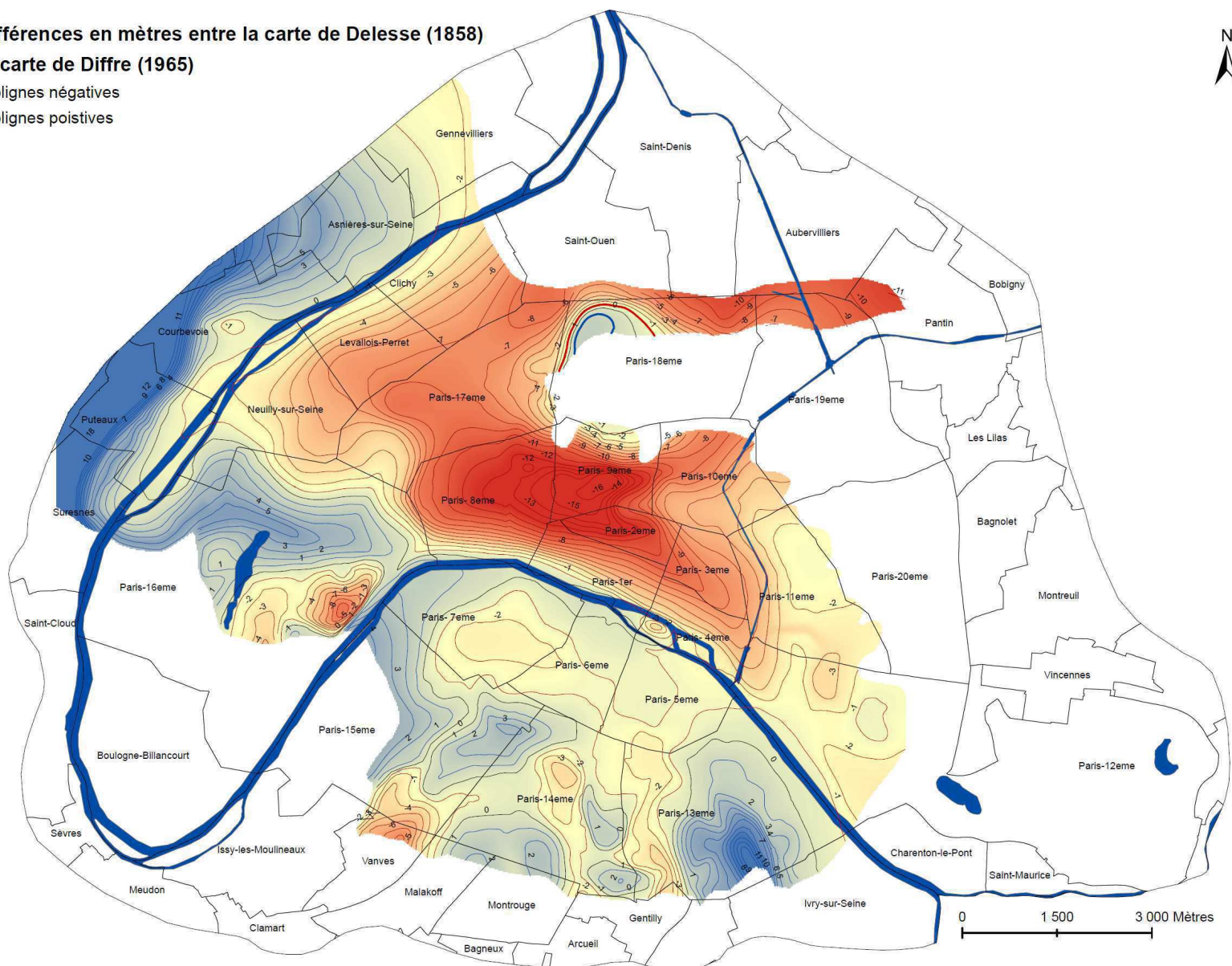


Figure 1. 51: Carte piézométrique de 1965 (Ph. Diffre).



**Isodifférences en mètres entre la carte de Delesse (1858)  
et la carte de Diffre (1965)**

- Isolignes négatives
- Isolignes positives



**Figure 1. 52: Carte d'isodifférences entre la carte piézométrique de Delesse (1858) et la carte piézométrique de Diffre (1965).**

### → Evolution de 1975 à 1990

Jusqu'en 1975, la situation semblait relativement stable jusqu'à la survenue d'incidents. Des caves, des parkings (Figure 1. 53) et des chantiers de construction furent inondés ; des bétons subirent une altération précoce réduisant la capacité portante des fondations (Berger, 1983) et des fontis se formèrent probablement. La majorité des bâtiments touchés furent construits postérieurement à 1960 dans les zones où les assises géologiques superficielles furent « asséchées » artificiellement. Les secteurs les plus touchés se situent dans les arrondissements du centre de la rive droite de la Seine (place de la Madeleine), dans le Parc Monceau, mais également dans la partie haute des champs Elysées et dans des villes de la proche banlieue au Nord de Paris.



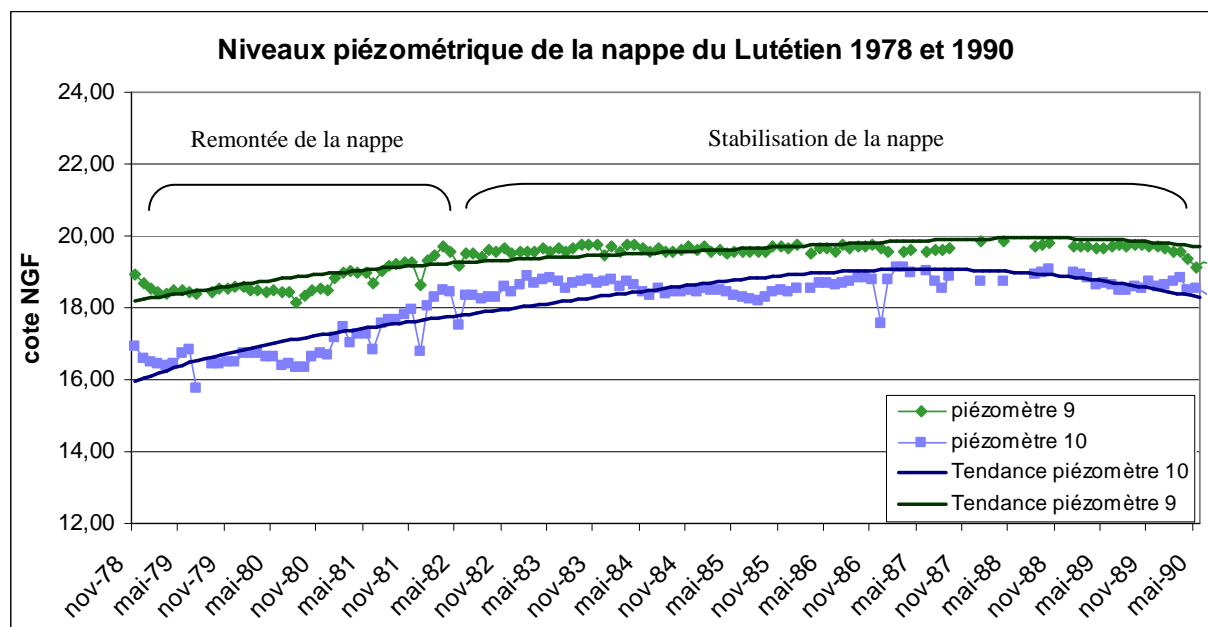
**Figure 1. 53: Inondation d'un parking de la rue Bergère (Paris 9e) par remontée de nappe en 1975 (photo : G. BERGER).**

Ces incidents résultèrent d'une remontée générale des niveaux piézométriques causée par trois facteurs principaux. Le premier découle d'un allègement important du nombre de pompages suite à la décentralisation de nombreux industriels. Le second correspond à une diminution du nombre de constructions, de grands travaux, prélevant des débits d'eau important dans les nappes comme le Forum des Halles. Seul le chantier du RER B fut entrepris en 1977, engendrant des pompages au niveau de la gare Saint-Michel, dont les conséquences furent amorties par la Seine à proximité. Le troisième facteur correspond à une pluviométrie excédentaire à partir de 1977, alors qu'un déficit de pluviométrie s'était fait ressentir entre 1970 et 1976.

Afin de pallier les répercussions de ces ennoissements, de nombreux systèmes de drainage ou de pompage furent mis en place sur certains ouvrages (métro, RER, parking ...) et les nappes se stabilisèrent à partir de 1984.

Ces variations piézométriques furent enregistrées par des piézomètres de l'Inspection Générale des Carrières de Paris et nous permettent de constater deux phases visibles sur la Figure 1. 54 qui sont :

- une remontée des nappes jusqu'au début de l'année 1982.
- une stabilisation des niveaux piézométriques après cette date.



**Figure 1. 54: Niveaux piézométriques de la nappe du Lutétien entre 1978 et 1990.**

En 1986, Colin a établi une carte piézométrique de 1982 en y superposant les pompages (Figure 1. 55). Cette carte met en évidence l'influence des prélèvements d'eau sur le niveau de la première nappe rencontrée en rive droite de la Seine. Elle présente un cône de rabattement important situé entre les 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup>, 8<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> arrondissements avec une cote piézométrique minimum de 19 m NGF. Cette zone présente une densité de pompages significative.

En 1989, Anne-Marie Prunier-Leparmentier réalisa une carte piézométrique de Paris (Figure 1. 56). Cette carte nous montre trois zones de recharge des nappes qui sont situées au niveau du Bois de Boulogne, de la Butte de Belleville et du 14<sup>e</sup> arrondissement. Deux dépressions piézométriques sont visibles. La première se trouve en bordure de Seine dans le 15<sup>e</sup> arrondissement et la seconde, bien plus importante englobe les quatre premiers arrondissements ainsi que le 8<sup>e</sup> et le 9<sup>e</sup>. Trois zones d'anomalies piézométriques sont également visibles. Elles correspondent à des mesures s'intégrant mal à la piézométrie générale comme des zones de fossés, de fortes épaisseurs de remblais et des zones probables de fontis.

Les cartes de Colin et de Prunier-Leparmentier ne présentent pas de différences piézométriques importantes ce qui reflète une stabilité relative des niveaux à Paris entre 1982 et 1989.

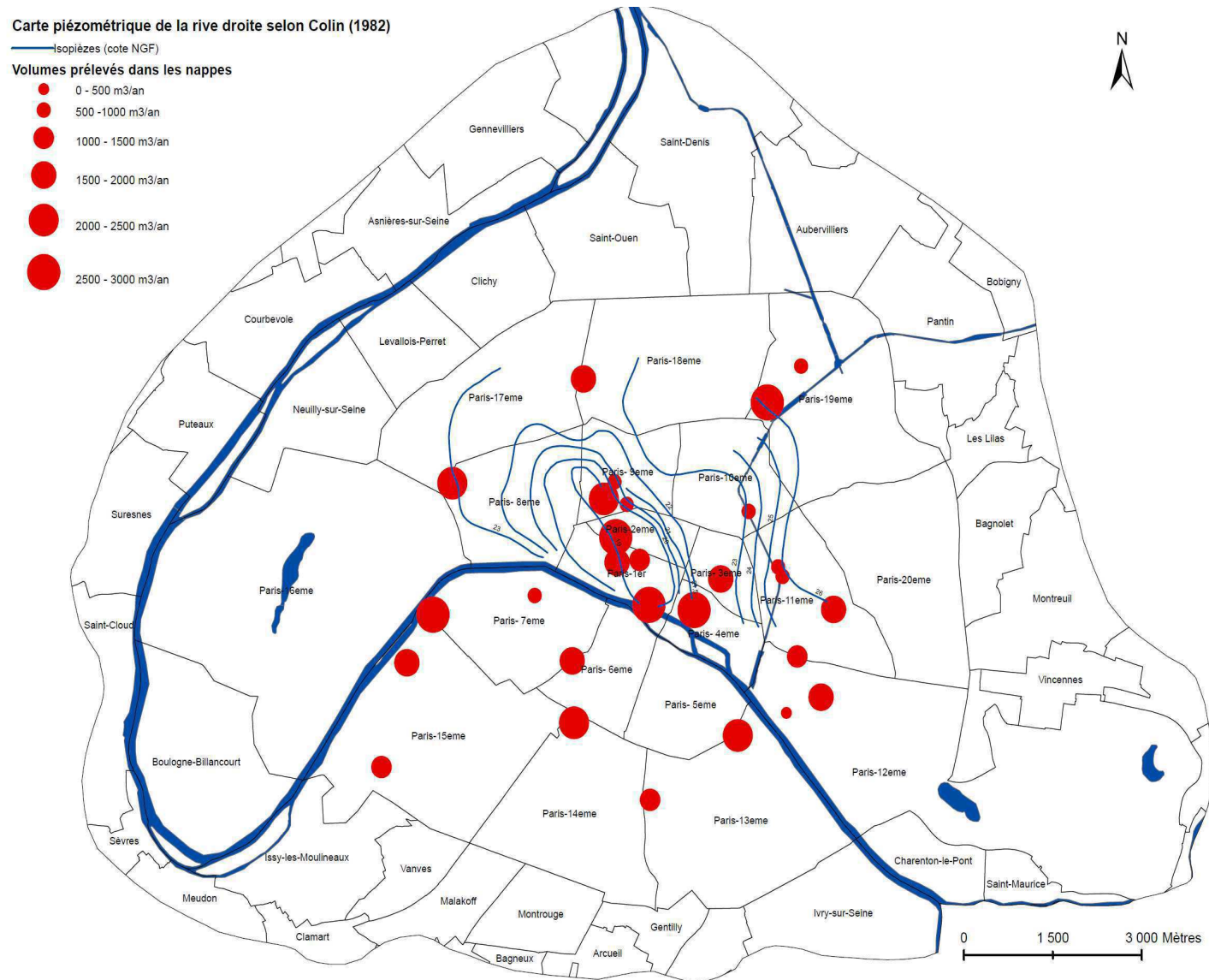


Figure 1. 55: Carte piézométrique en 1982 associée aux pompages (Colin).



Carte piézométrique Anne-Marie Prunier-Leparmentier (octobre 1989)

- Isopièzes (cote NGF)
- - - Zones à anomalies
- Piézomètres (cote NGF)
- ▨ Nappes perchées

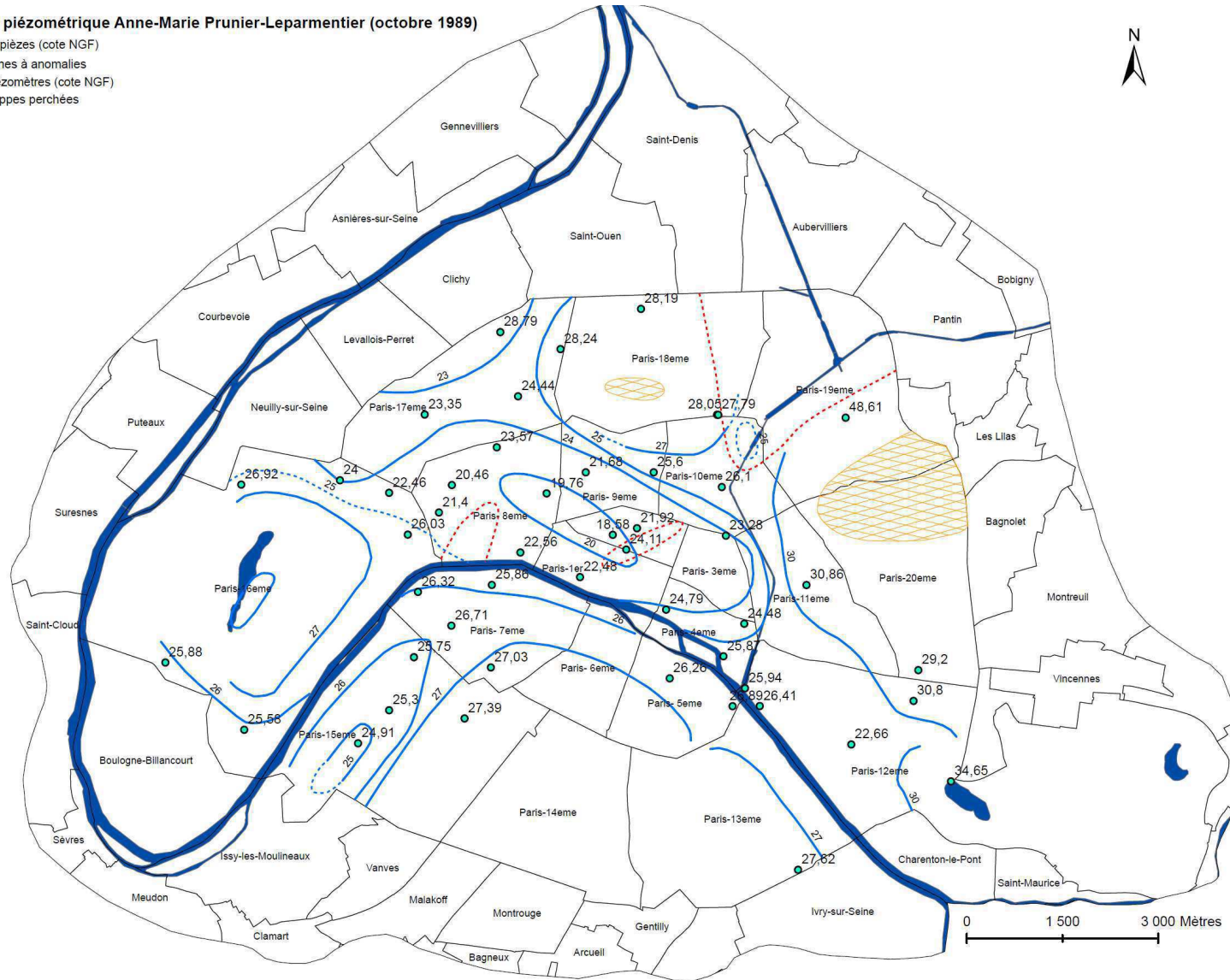


Figure 1. 56: Carte piézométrique de Paris en 1989 (Prunier-Leparmentier).

→ Evolution de 1990 à 2000

Durant les années 1990, des chantiers de grande ampleur (Météor ou ligne 14, Eole ou RER E pour les plus connus) ont modifié les niveaux piézométriques qui s'étaient stabilisés à la fin des années 1980. Les débits d'eau prélevés durant leur construction furent importants (0,25 m<sup>3</sup>/s pour Eole pendant quatre ans répartis en 14 pompes). Trois phases successives des travaux purent être enregistrées par des piézomètres de l'IGC et de la RATP entre 1990 et 2000, implantés dans les nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur (Figure 1. 57) à proximité de la gare Saint-Lazare :

- Jusqu'à la fin 1991 l'ensemble des niveaux piézométriques des nappes est stabilisé.
- A partir de 1992, sous l'effet du début du chantier Eole, la nappe commence à montrer un rabattement compris entre 5 et 7 mètres dans le Lutétien (piézomètres 9 et 10). En avril 1997, grâce à l'installation de nouveaux piézomètres dans l'Yprésien supérieur (E20, E85, E86, e36) par la SNCF, une diminution piézométrique de 15 mètres au niveau de la gare Saint-Lazare est constatée. En septembre 1998, le plus gros des travaux Eole est fini et les pompages dans les nappes lutétienne et yprésienne s'arrêtent. Les niveaux piézométriques retrouvent alors une cote proche de la « normale ».
- A partir de novembre 1998, une nouvelle série de pompages correspondant au passage du chantier Météor (ligne 14) à proximité de la gare Saint-Lazare provoque des rabattements (entre 2 et 6 mètres) qui vont s'atténuer en août 1999.

La Figure 1. 57 présente également un léger rabattement de la nappe du Lutétien en 1992. Cette diminution piézométrique résulte de pompages pour dénoyer un parking (parking Lambel) construit illégalement à proximité de la gare Saint-Lazare et du tracé d'Eole à la fin des années 1960. Il fut ennoyé lors de la remontée généralisée des nappes à partir de 1975.

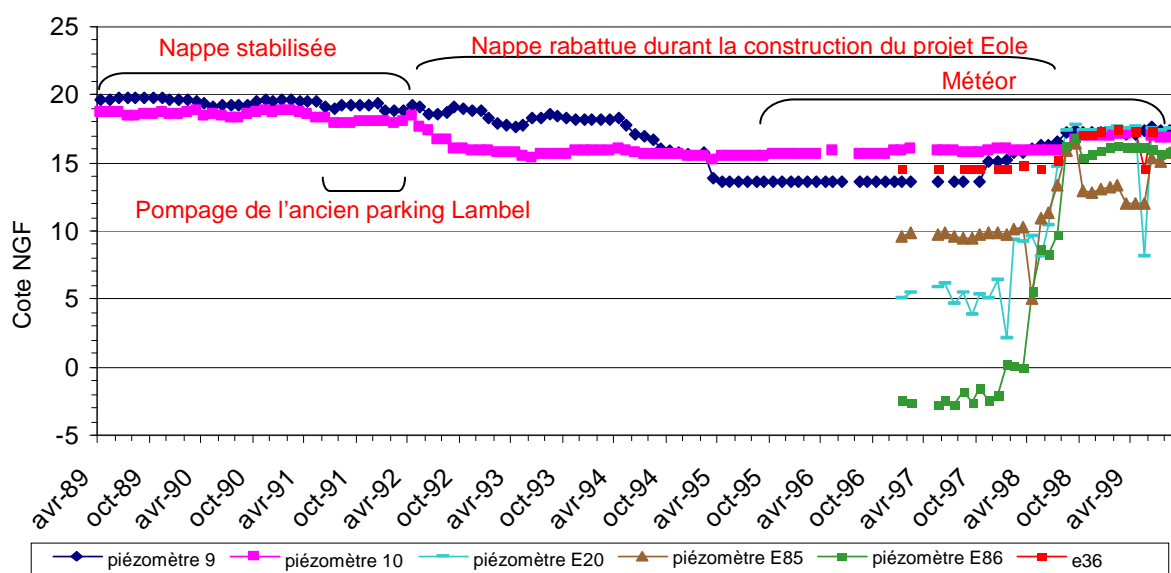


Figure 1. 57: Niveaux piézométriques à proximité de la station Haussmann- Saint Lazare durant les travaux de construction de RER Eole.



## → Évolution de 2000 à nos jours

Hormis ces deux chantiers importants qui ont influencé la piézométrie parisienne dans les années 1990, les niveaux piézométriques sont restés relativement stables avec une légère remontée des niveaux en 1999. Seuls quelques aménagements comme la ZAC de Bercy entre 2002 et 2010 ou la construction de la ligne 14 entre les stations Tolbiac et Olympiade entre janvier 2001 et décembre 2007 (rabattement de la nappe du Lutétien entre 1,5 m et 4m), ont modifié localement la piézométrie.

A l'Est de Paris, le départ d'industriels au début des années 2000 a engendré une remontée de 1 à 3 mètres dans la nappe du Bartonien.

Au Nord de Paris, sur les communes de Saint-Denis, la Courneuve et Saint-Ouen, l'implantation d'industriels a entraîné une diminution généralisée de la piézométrie de l'ordre de 1 à 3 mètres pour la première nappe rencontrée.

#### 2.4.2. Le présent

Afin de connaître l'évolution des niveaux de nappes de 2000 à aujourd'hui, nous avons dans un premier temps réalisé des cartes piézométriques de chaque nappe. Pour cela des données issues de 669 piézomètres répartis dans la zone d'étude furent utilisées (Figure 1. 58). Leur localisation précise a été vérifiée ainsi que l'identification de la nappe captée. Seuls les piézomètres assortis d'informations sur la position de la crépine et d'un sondage géologique furent retenus.

Les piézomètres utilisés sont issus de plusieurs bases de données qui sont :

- IGC : piézomètres répartis dans Paris intra-muros
- RATP : piézomètres localisés sur les voies ferrées gérées par la RATP et au niveau de leurs ateliers.
- Conseil Général du 93 (CG93) : piézomètres se trouvant en Seine-Saint-Denis.
- BRGM : piézomètres issus de la base de données Infoterre répartis sur toute la zone d'études, mais principalement dans les villes limitrophes de la capitale.

L'origine des données est répertoriée dans le Tableau 1. 16 en fonction de leur répartition dans les différentes nappes.

Nappes	piézomètres IGC	piézomètres RATP	piézomètres CG 93	piézomètres BRGM	total piézomètres
Alluvion anciennes	64	38	1	55	158
Bartonien	38	44	5	34	121
Lutétien	94	74	1	78	247
Yprésien Supérieur	23	4	0	24	51
Yprésien Inférieur	5	2	0	8	15
Campanien	13	5	0	59	77
total	237	167	7	258	669

Tableau 1. 16: Origine des piézomètres en fonction des nappes mesurées.

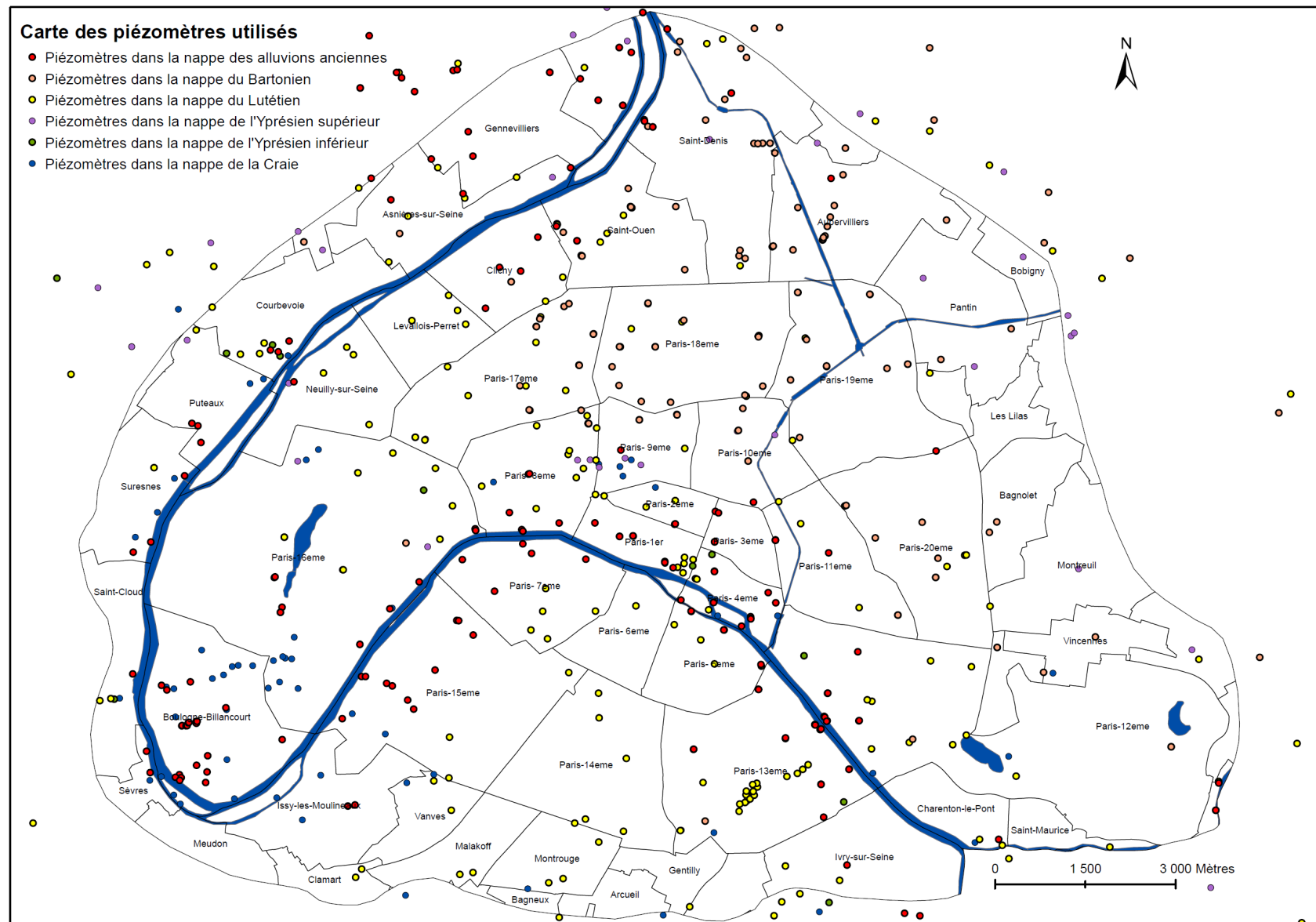


Figure 1. 58: Carte de localisation des piézomètres utilisés en fonction de la nappe mesurée.

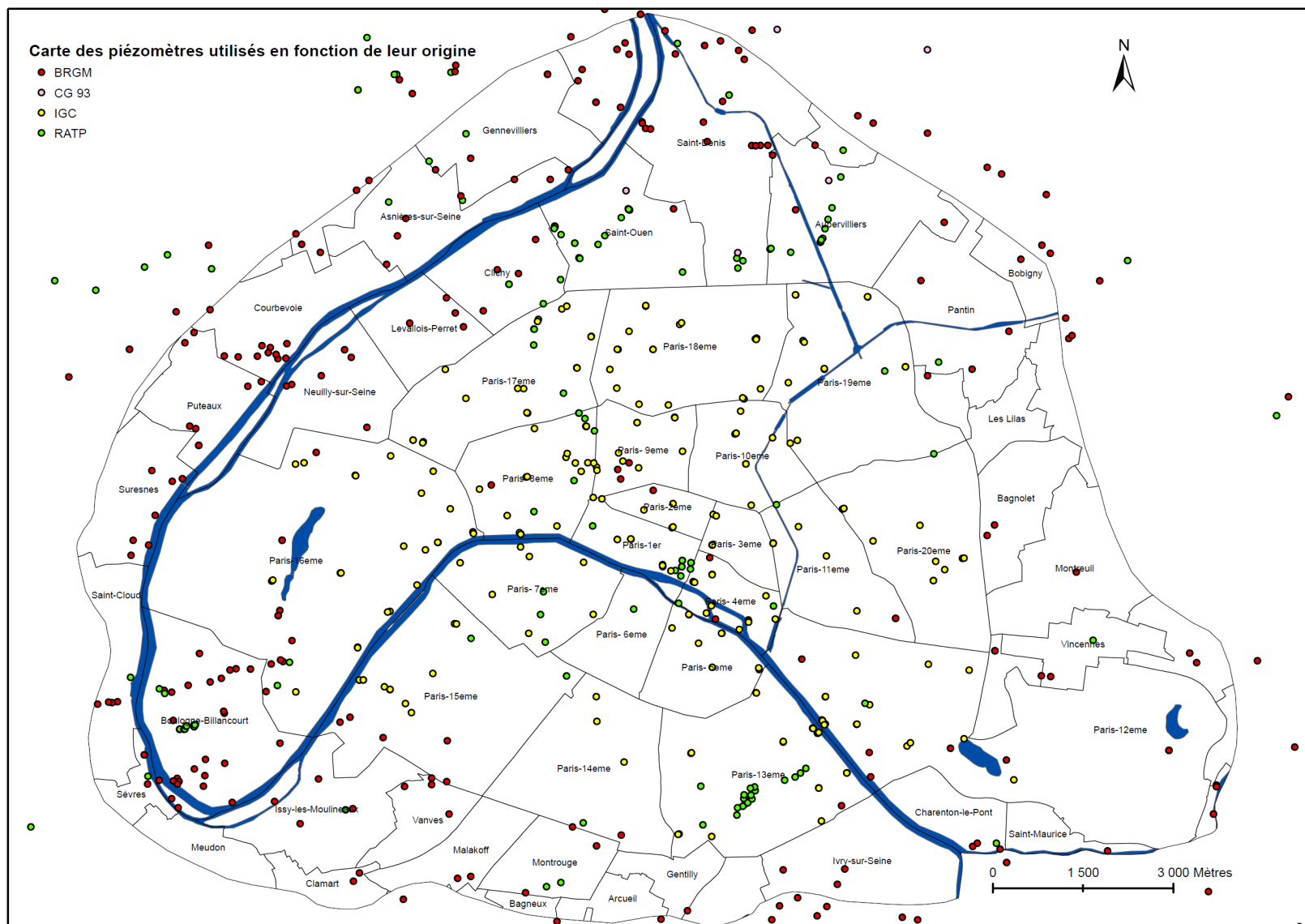


Figure 1. 59: Carte des piézomètres utilisés en fonction de l'origine des données.

Les données issues de la RATP, de l'IGC et du CG93, correspondent à des valeurs mesurées, dans 95% des cas, entre 2000 et 2010. Quant aux données issues du BRGM, elles sont plus anciennes et sont localisées principalement dans les villes limitrophes de la capitale (Figure 1. 59). Ce sont les seules données accessibles qui nous permettent d'avoir une idée de la piézométrie, dans ce secteur en particulier pour les nappes profondes.

Le Tableau 1. 17 répertorie le nombre de mesures disponibles du BRGM par aquifère selon quatre périodes de 10 ans en ne retenant que la valeur la plus récente pour un ouvrage donné.

	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2010	piézomètres BRGM
<b>aa</b>	27	3	7	18	55
<b>Bartonien</b>	21	1	3	9	34
<b>Lutétien</b>	60	7	4	7	78
<b>Yprésien Supérieur</b>	15	2	3	4	24
<b>Yprésien Inférieur</b>	8	0	1	0	9
<b>Campanien</b>	36	5	7	10	58
<b>total</b>	167	18	25	48	258

**Tableau 1. 17: Piézomètres du BRGM utilisés en fonction de l'année de mesure.**

L'ensemble des piézomètres répartis sur toute la zone d'étude nous a permis de réaliser des cartes piézométriques pour chaque nappe de l'Eocène, la nappe alluviale et la nappe de la Craie, que nous considérons comme représentative de l'année 2010.

#### → Piézométrie de la nappe des alluvions anciennes en 2010

La carte des alluvions anciennes de 2010 (Figure 1. 60) présente trois zones distinctes.

La première, qui représente 45% de l'étendue géographique, correspond aux endroits où les alluvions sont asséchées. Cette zone se localise au niveau « des reliefs » parisiens des 13<sup>e</sup> et 14<sup>e</sup> arrondissements, des bois de Vincennes et Boulogne (excepté au niveau des lacs inférieur et supérieur), de Courbevoie, d'Asnières-sur-Seine et des parties hautes de Neuilly-sur-Seine et Levallois-Perret. La nappe alluviale est asséchée, car les alluvions anciennes ne reposent pas sur une formation peu perméable capable de retenir l'eau. L'eau qui s'y infiltre est donc drainée verticalement vers les formations aquifères sous-jacentes. Concernant les arrondissements parisiens du 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup>, 8<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> la cause est tout autre, car l'assèchement résulte de prélèvements importants d'eau.

La seconde zone correspond aux secteurs où la nappe des alluvions anciennes est libre. Ils se localisent principalement à proximité de la Seine et présentent bien souvent des niveaux piézométriques inférieurs à la cote du fleuve. Cette situation révèle la présence de prélèvements d'eau induisant une alimentation de la nappe par la Seine. Dans cette zone, la nappe des alluvions

anciennes repose sur une formation peu perméable, ou se trouve en continuité hydraulique avec la nappe de la formation sous-jacente.

La dernière zone représente les secteurs où la nappe alluviale est captive sous les alluvions modernes. Elle se situe en bordure de la Seine sur une distance comprise entre 100 mètres et 600 mètres.

→ Piézométrie de la nappe du Bartonien en 2010

La nappe du Bartonien (Figure 1. 61) se situe en rive droite de la Seine et dans la boucle de Gennevilliers. En rive gauche, se trouvent des lambeaux de Bartonien qui sont asséchés.

Lorsque les Sables de Beauchamp supérieurs sont affleurants, ils ont subi une certaine altération atteignant les Sables de Beauchamp médians. Ceci a modifié localement la perméabilité du mur de la nappe du Bartonien favorisant une drainance verticale de l'eau d'infiltration au profit de la nappe sous-jacente. Ainsi certains secteurs de la nappe du Bartonien se retrouvent naturellement dénoyés ou de très faible épaisseur (quelques centimètres). C'est le cas du Sud du Bois de Vincennes, des 8<sup>e</sup>, 12<sup>e</sup>, 16<sup>e</sup> et 17<sup>e</sup> arrondissements ainsi que de Courbevoie. Les zones dénoyées artificiellement par des pompages se situent dans les 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> arrondissements.

D'après les niveaux piézométriques de la nappe du Bartonien, nous observons une recharge qui s'effectue au niveau de la Butte de Belleville avec des niveaux piézométriques qui croissent en fonction de la topographie allant jusqu'à atteindre une cote de 55 mètres. Ce comportement traduit l'existence d'apports horizontaux en provenance de la banlieue Est pour Vincennes et du Sud de Montreuil mais également l'alimentation de la nappe par des apports verticaux, issus des formations stampiennes, via des discontinuités dans les formations peu perméables sus-jacentes.

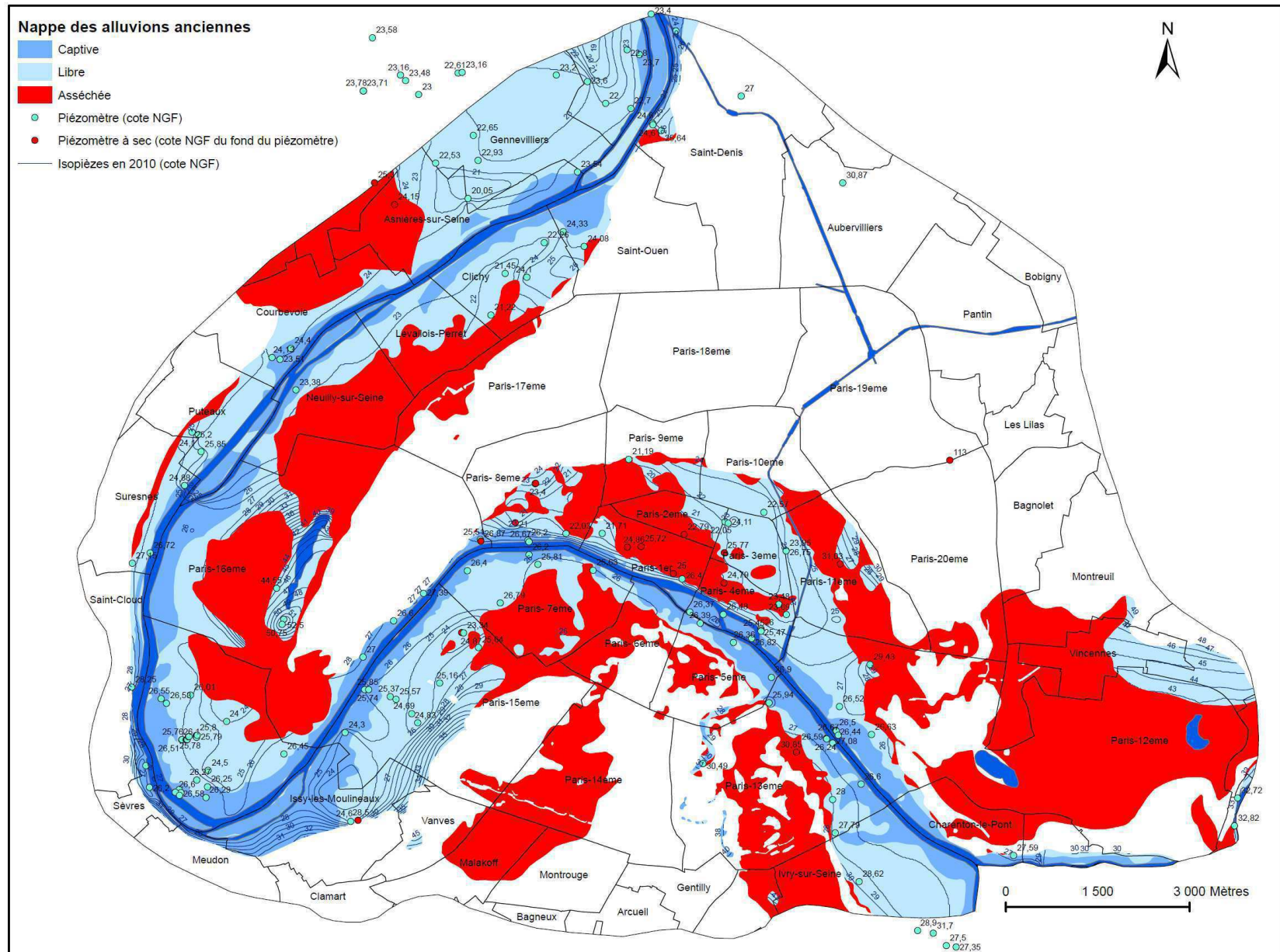
Dans la boucle de Gennevilliers et dans le 15<sup>e</sup> arrondissement, le niveau piézométrique de la nappe bartonienne est inférieur à la cote de la Seine, ce qui révèle la présence de pompages, induisant une alimentation de la nappe par le fleuve.

Dans la partie Nord de Paris (Figure 1. 62), la piézométrie du Bartonien est plus perturbée et plusieurs zones sont identifiables.

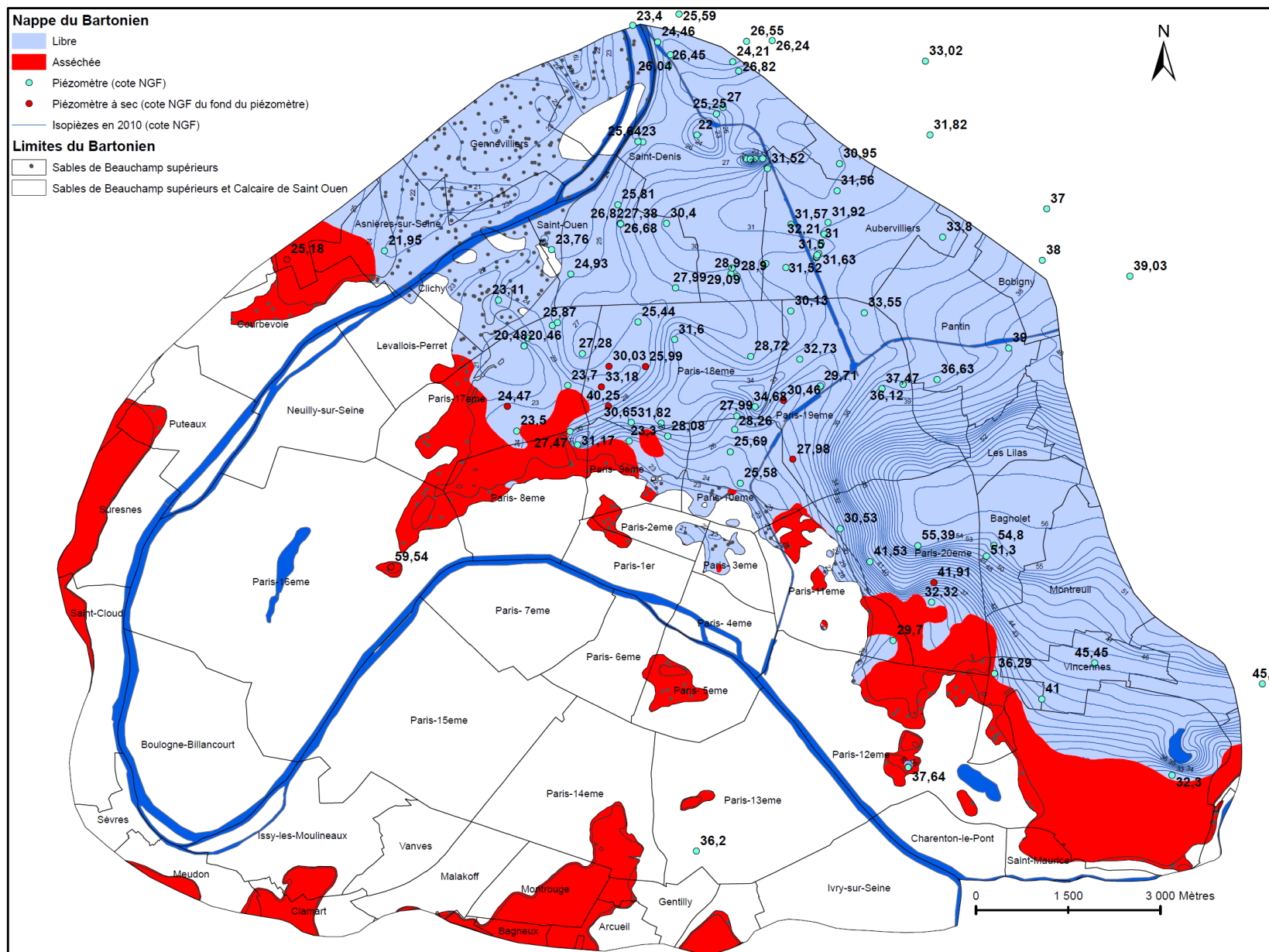
La première située au nord-est du bassin de la Villette, au niveau du piézomètre mesurant la cote 29,71 m, montre une piézométrie basse par rapport aux niveaux avoisinants. Cela reflète, sans doute, une connexion avec la nappe du Lutétien sous-jacente à travers des zones de karst.

La seconde zone identifiée est localisée au sud-est du 18<sup>e</sup> arrondissement (piézomètre mesurant une cote de 34,68 m) et présente des niveaux piézométriques élevés. Ce secteur correspond à l'entrée du tunnel du RER E qui pourrait être responsable de cet état.

La dernière zone se trouve au carrefour des 8<sup>e</sup>, 9<sup>e</sup>, 17<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> arrondissements où la piézométrie de la nappe du Bartonien remonte jusqu'à 31,17 m. Cette variation pourrait traduire des apports d'eau en provenance de la butte de Montmartre.







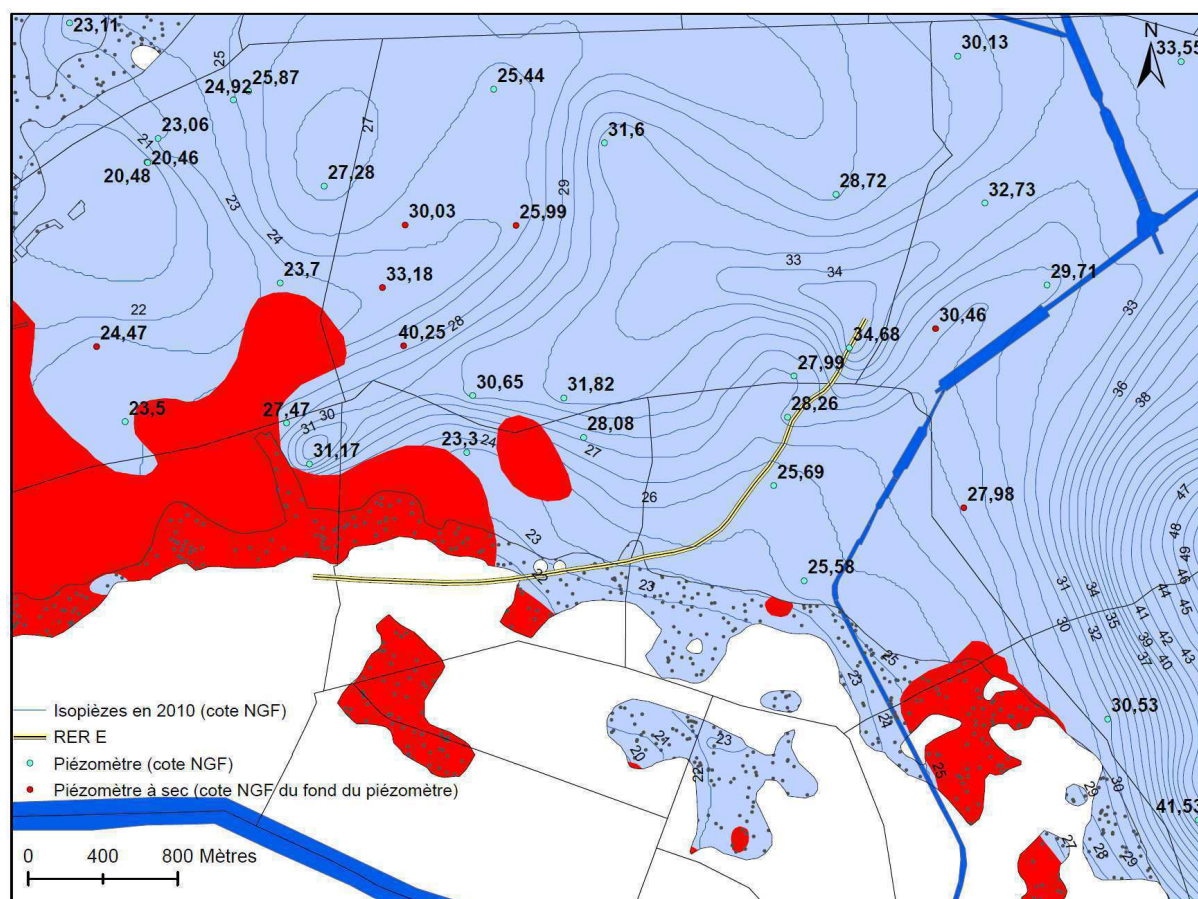


Figure 1. 62: Carte piézométrique de la nappe du Bartonien (2010) de la rive droite de Paris.

→ Piézométrie de la nappe du Lutétien en 2010

Le Lutétien (Figure 1. 63) présente quelques secteurs asséchés, localisés à Ivry-sur-Seine et dans le 16<sup>e</sup> arrondissement, qui révèlent la présence de pompages. Sur le reste de la zone d'étude, la nappe est libre puis captive vers le NE sous l'effet du pendage de son toit en bordure du synclinal de Saint-Denis.

La piézométrie de la nappe lutétienne en rive gauche de Paris traduit l'existence d'apports horizontaux en provenance de la banlieue sud vers la Seine. Dans le 7<sup>e</sup> arrondissement le niveau piézométrique de la nappe est inférieur au niveau du fleuve, ce qui révèle l'existence de pompages qui la rabattent.

A l'Est de la zone d'étude (communes des Lilas, de Bagnolet, de Montreuil et de Vincennes) et dans le Bois de Boulogne à l'Ouest, la nappe se recharge par des apports verticaux en provenance de la nappe bartonienne et s'écoule vers la Seine. Localement, le lac Daumesnil dans le Bois de Vincennes et les lacs Supérieur et Inférieur dans le Bois de Boulogne, alimentent la nappe lutétienne sous l'influence de fuites. Il existe dans le secteur de Bercy des prélèvements d'eau qui modifient la piézométrie formant un cône de rabattement atteignant la cote NGF de 21,64 m en octobre 2010. Au



centre de Paris en rive droite de nombreux pompages perturbent considérablement la piézométrie de la nappe lutétienne en inversant le sens d'écoulement qui se fait dans ce secteur à partir du fleuve. La piézométrie atteint au centre de la dépression, à proximité du forum des Halles, une cote de 14,11 m, soit plus de 12 mètres sous le niveau de la Seine. Le secteur comprenant les communes de Neuilly-sur-Seine, Levallois-Perret, Clichy, Saint-Ouen et le 17<sup>e</sup> arrondissement présente également une diminution du niveau piézométrique qui atteint en son centre la cote de 17,29 mètre. Ceci met en évidence l'existence de pompages importants. Une telle situation est également présente dans la boucle de Gennevilliers.

Nous pouvons noter que, comme la nappe du Bartonien, la nappe lutétienne présente un dôme piézométrique au carrefour des 8<sup>e</sup>, 9<sup>e</sup>, 17<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> arrondissements. Ce comportement local, révèle une alimentation de la nappe lutétienne par des apports verticaux de la nappe sus-jacente, favorisés vraisemblablement par la présence de fontis.

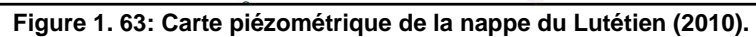
En résumé, l'écoulement général de la nappe lutétienne se fait à partir des secteurs hauts (Bagnolet, Montrouge et le Bois de Boulogne) vers la Seine et vers une zone de dépression comprise schématiquement dans le triangle Neuilly-sur-Seine, Clichy et le quai de la Rapée.

#### → Piézométrie de la nappe de l'Yprésien supérieur en 2010

La nappe de l'Yprésien supérieur, quasi absente à Paris en rive gauche, est largement captive dans le reste de la zone d'étude. La carte piézométrique de la nappe (Figure 1. 64) révèle différents secteurs d'alimentation. Le premier se localise dans le Bois de Boulogne et correspond à des apports verticaux en provenance de la nappe sus-jacente. Le second, situé au SE de la zone d'étude (Nogent-sur-Marne et Fontenay-sous-Bois), trahit l'existence d'apports latéraux en provenance de la banlieue. Une dernière zone d'alimentation par des apports latéraux, est visible à l'Ouest au niveau de Suresnes.

Au centre de Paris, en rive droite (1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup>, 8<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> arrondissements parisiens), un cône de rabattement révèle, comme pour la nappe du Lutétien et la nappe des alluvions anciennes, des prélèvements d'eau importants. Cela indique une alimentation de la nappe par la Seine à travers les alluvions anciennes dans ce secteur. Dans la fosse Saint-Denis et dans la boucle de Gennevilliers, la nappe de l'Yprésien supérieur présente des dépressions piézométriques avec des cotes NGF atteignant 12,5 m et 10 m. Ces valeurs mettent en évidence l'existence d'effets de groupes de pompages industriels importants.

Le sens d'écoulement général de la nappe de l'Yprésien supérieur se fait à partir du Bois de Boulogne et du SE de la zone d'étude vers la fosse Saint-Denis et vers la boucle de Gennevilliers pour atteindre des niveaux piézométriques particulièrement bas.





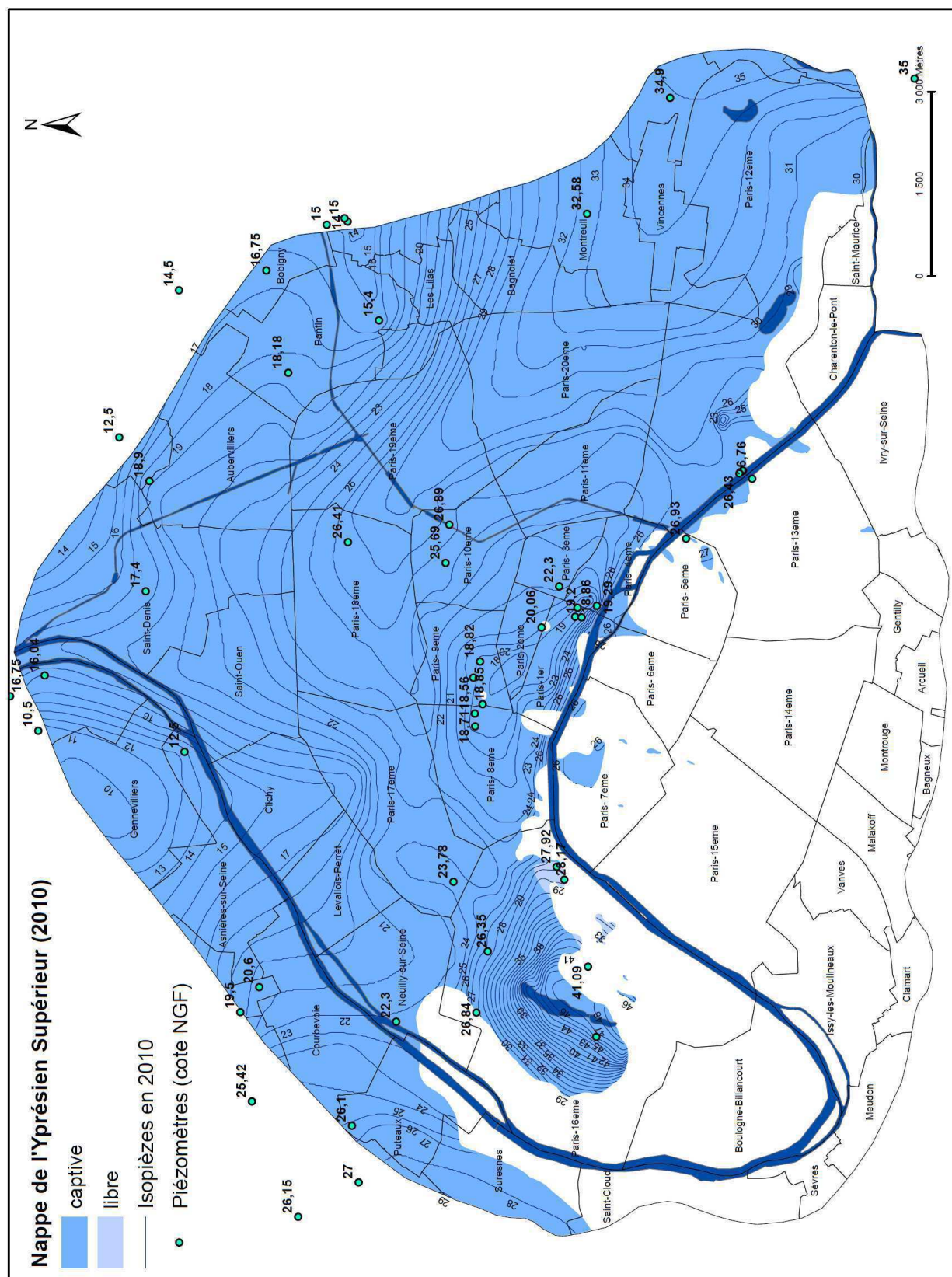


Figure 1. 64: Carte piézométrique de l'Yprésien supérieur en 2010.

### → Piézométrie de la nappe de l'Yprésien inférieur en 2010

La piézométrie de la nappe de l'Yprésien inférieur n'est connue que sur 15 piézomètres avec une piézométrie présentant peu de différences avec la nappe de l'Yprésien supérieur en rive droite et la nappe du Lutétien en rive gauche. Nous avons donc tracé une carte (Figure 1. 65) largement hypothétique très proche des nappes sus-jacentes. Cette carte ne doit être considérée que comme indicative dans l'attente de nouvelles données.

### → Piézométrie de la nappe de la Craie en 2010

La carte piézométrique de la nappe de la Craie (Figure 1. 66) a été réalisée grâce à 77 piézomètres implantés principalement en bordure de Seine et dans la boucle de Boulogne où la craie se situe à de faibles profondeurs et est généralement recouverte par des alluvions anciennes.

La nappe de la Craie présente deux zones où son niveau piézométrique est supérieur au niveau de la Seine. La première se trouve au Sud de Paris et montre une cote piézométrique de 58,9 m. Cette zone de recharge traduit des apports d'eau horizontaux en provenance de Chatillon vers le fleuve. Quant à la seconde zone de recharge, elle se situe dans le Bois de Boulogne et atteint des valeurs piézométriques supérieures à 44 m. La nappe semble être alimentée dans le Bois de Boulogne par des infiltrations d'eau au détriment des formations aquifères sus-jacentes, car dans ce secteur, l'Argile "Plastique" présente des lentilles sableuses.

D'une manière générale, la nappe de la Craie est pompée à de faibles profondeurs (entre 10 et 20 mètres) sous les alluvions anciennes, dans les secteurs où la Craie de Meudon est fissurée. Ces zones se trouvent dans la boucle de Boulogne ainsi que sur la commune d'Issy-les-Moulineaux. Les niveaux piézométriques y sont inférieurs à la cote de la Seine, ce qui met en évidence une alimentation locale de la nappe de la Craie par le fleuve à travers les alluvions anciennes.

Sur le reste de la zone d'étude, la nappe est captive, et semble s'écouler vers le Nord. A notre connaissance, il n'existe pas de données piézométriques récentes dans la fosse Saint-Denis. L'unique donnée localisée sur la commune de Saint-Denis remonte à 1887 et indique une cote piézométrique de 28,9 m NGF. Cette valeur est à prendre avec beaucoup de précautions car la fiche renseignant la position du forage n'indique pas précisément l'emplacement de la crépine.

La piézométrie générale de la nappe de la Craie possède des valeurs se plaçant autour de celles des nappes yprésiennes. Cela pourrait indiquer que ces nappes possèdent une piézométrie relativement proche au Nord de la zone d'étude.

### → Piézométrie de la nappe phréatique à Paris en 2010

Afin de pouvoir comparer le niveau piézométrique actuel des nappes parisiennes avec les cartes anciennes précédemment citées, nous avons réalisé une carte piézométrique de la nappe phréatique (Figure 1. 67). Pour cela, nous avons pris en compte les niveaux piézométriques des premières nappes rencontrées en partant de la surface. En l'absence de données piézométriques sur les bordures des formations aquifères, nous avons considéré le niveau piézométrique de la nappe sous-jacente.

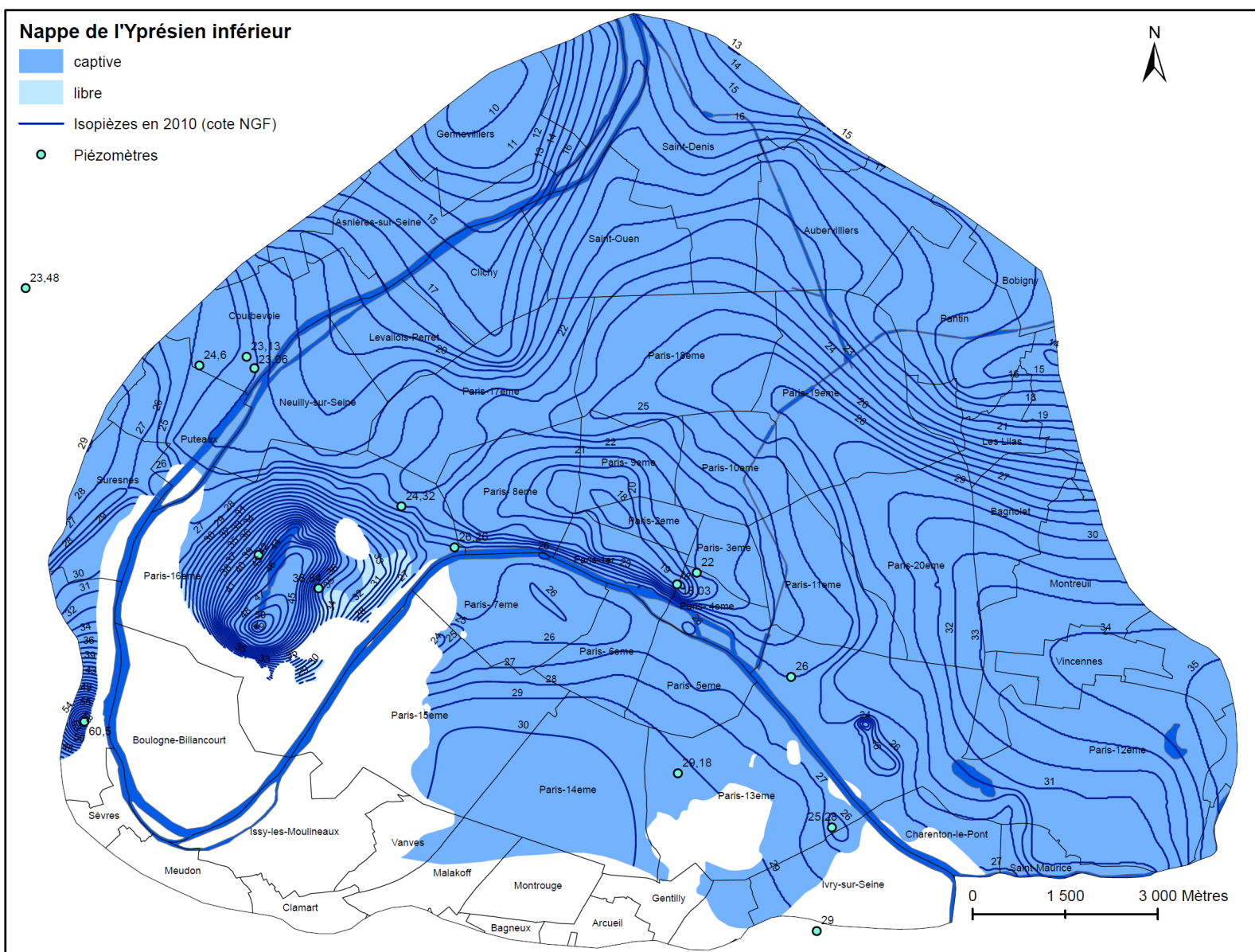
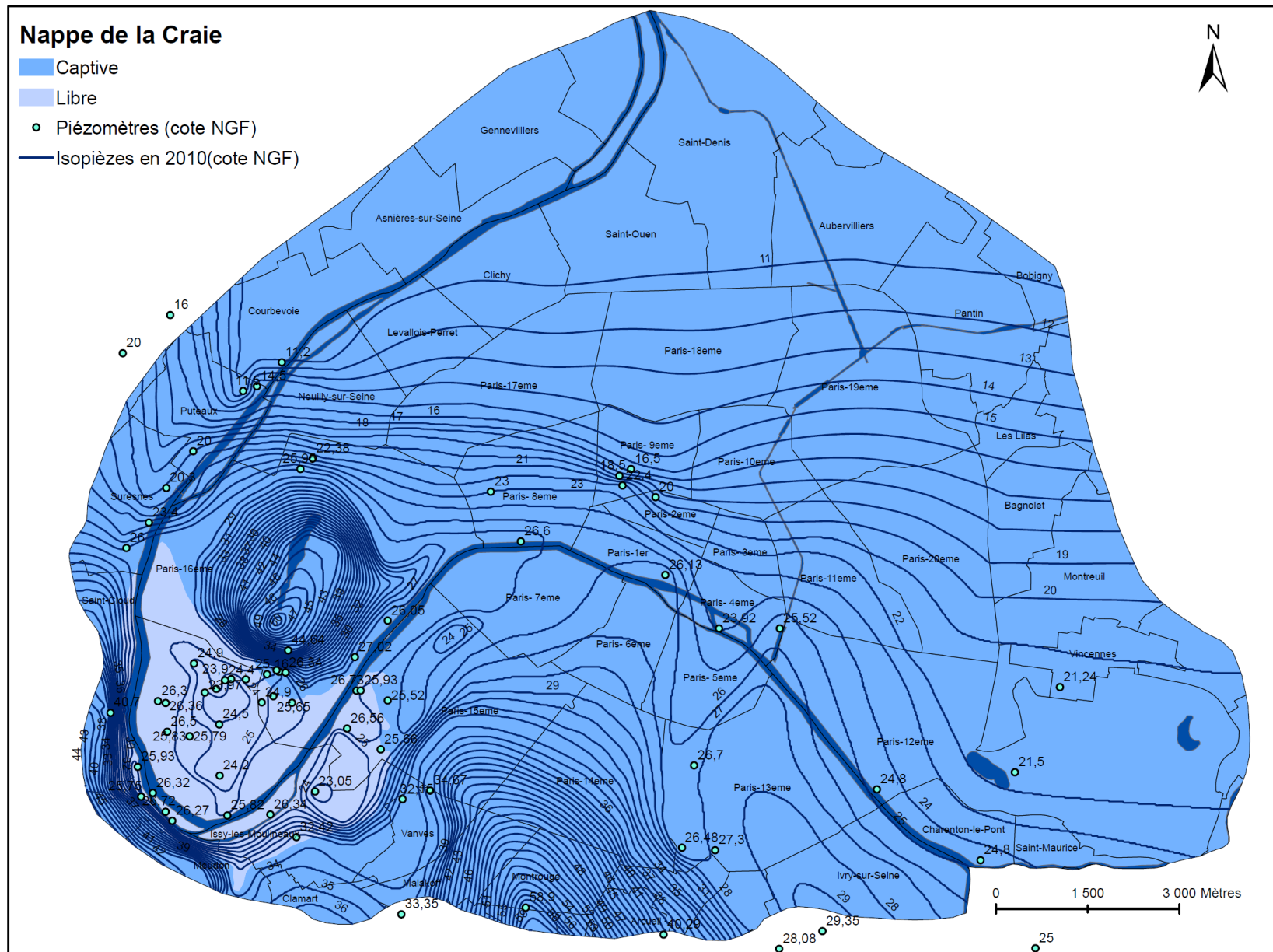


Figure 1. 65: Carte piézométrique de la nappe de l'Yprésien inférieur (2010).





Afin de mettre en évidence l'influence des prélèvements d'eau à Paris sur l'ensemble des nappes, nous avons reporté l'emplacement des différents pompages recensés sur la carte piézométrique de la nappe phréatique. La Figure 1. 68 nous permet de constater que la majorité des cônes de dépressions piézométriques sont associés aux prélèvements d'eau. Il existe cependant des zones de dépressions dépourvues de pompages identifiés notamment dans la boucle de Boulogne et à Issy-les-Moulineaux. L'interprétation de cette carte a donc ses limites.

#### 2.4.3. Evolution temporelle piézométrique

L'évolution de la piézométrie peut être mise en évidence en comparant les cartes piézométriques anciennes avec notre carte de la nappe phréatique dans la zone d'étude en 2010.

→ Comparaison entre piézométrie naturelle et piézométrie actuelle

La carte d'isodifférences (Figure 1. 69) entre la carte piézométrique de Delesse (1862) considérée comme étant l'état naturel et la carte piézométrique de 2010 nous donne un aperçu des modifications des niveaux. Cette carte présente un abaissement générale de la nappe de l'Eocène à Paris avec une dépression majeure au niveau de la rive droite de la Seine, allant jusqu'à atteindre 15 m dans les quatre premiers arrondissements. La rive gauche est également touchée, en particulier au niveau des 5<sup>e</sup>, 6<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> arrondissements.

Certaines zones présentent des augmentations des niveaux piézométriques par rapport au niveau naturel. Les 13<sup>e</sup>, 14<sup>e</sup> et 15<sup>e</sup> arrondissements sont dans ce cas de figure. Ces différences se situent au niveau de la jonction de la nappe du Lutétien et des alluvions anciennes. Cette situation est vraisemblablement le résultat d'un artefact de la carte de Delesse étant donné le peu d'information précise disponible à l'époque à cet endroit.

La nappe phréatique située dans la boucle de Boulogne et en bordure de la Seine montre une hausse de son niveau piézométrique. Ce comportement résulte de la restructuration du fleuve ayant entraîné un rehaussement du fil de l'eau à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, donc après la réalisation de la carte de Delesse.

→ Comparaison entre piézométrie de la nappe phréatique en 1989 et piézométrie actuelle.

La carte d'isodifférences entre la carte piézométrique de 1989 et la carte piézométrique de 2010 (Figure 1. 70) exprime une diminution faible mais généralisée des niveaux piézométriques. Les zones les plus touchées se situent au centre de la rive droite de la Seine à Paris et dans le 17<sup>e</sup> arrondissement avec des abaissements piézométriques atteignant 5 m pour la ZAC des Batignolles. Ces variations sont essentiellement liées à de nouveaux aménagements, notamment à proximité de la Seine et à des chantiers de construction. Quelques secteurs de variation piézométrique positive, comme dans le 12<sup>e</sup> arrondissement, résultent essentiellement d'une imprécision due à l'évolution de la densité du nombre de mesures entre 1989 et 2010. Elles ne sont pas représentatives d'une évolution piézométrique réelle.



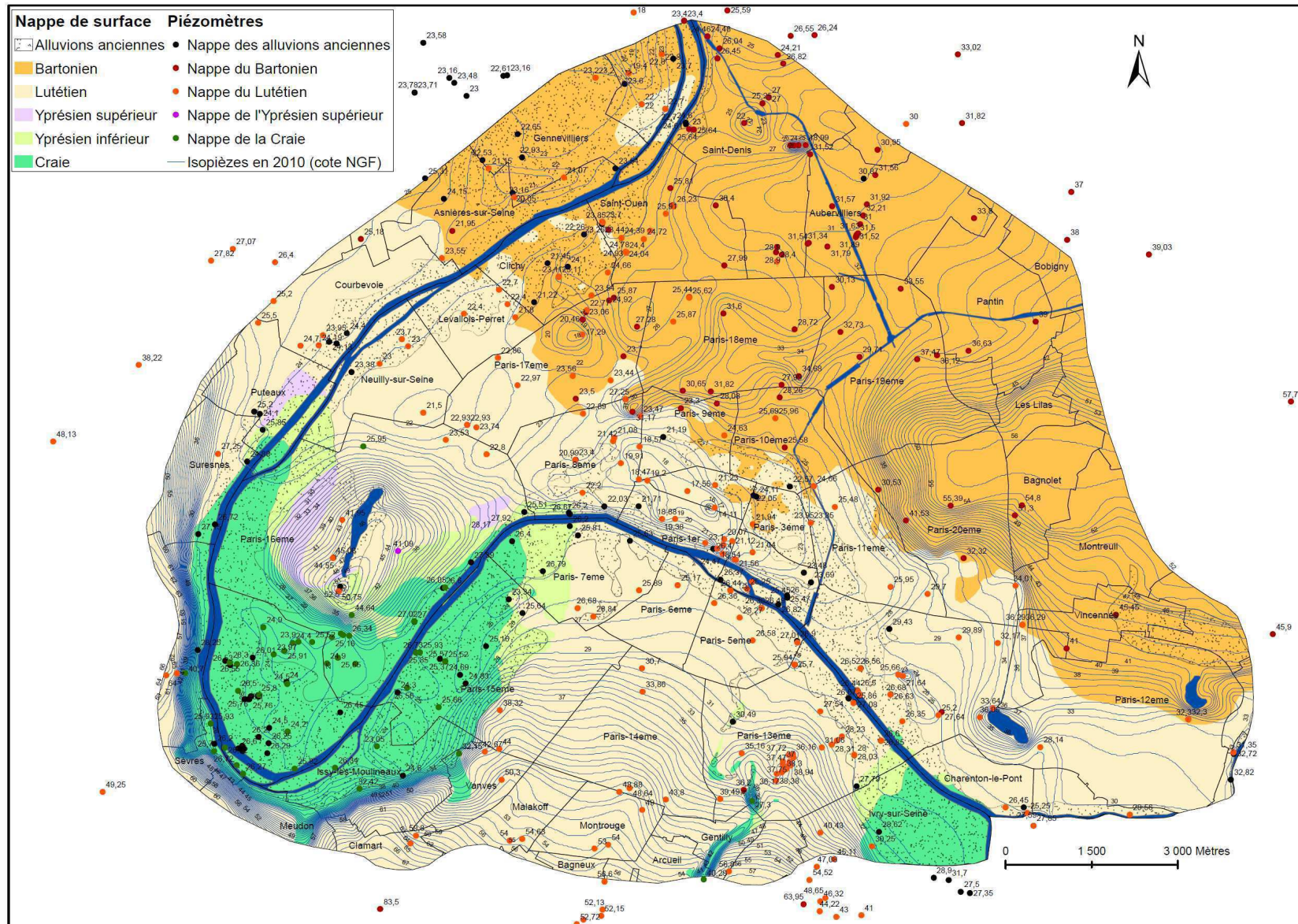


Figure 1. 67: Carte piézométrique de la nappe phréatique à Paris (2010).



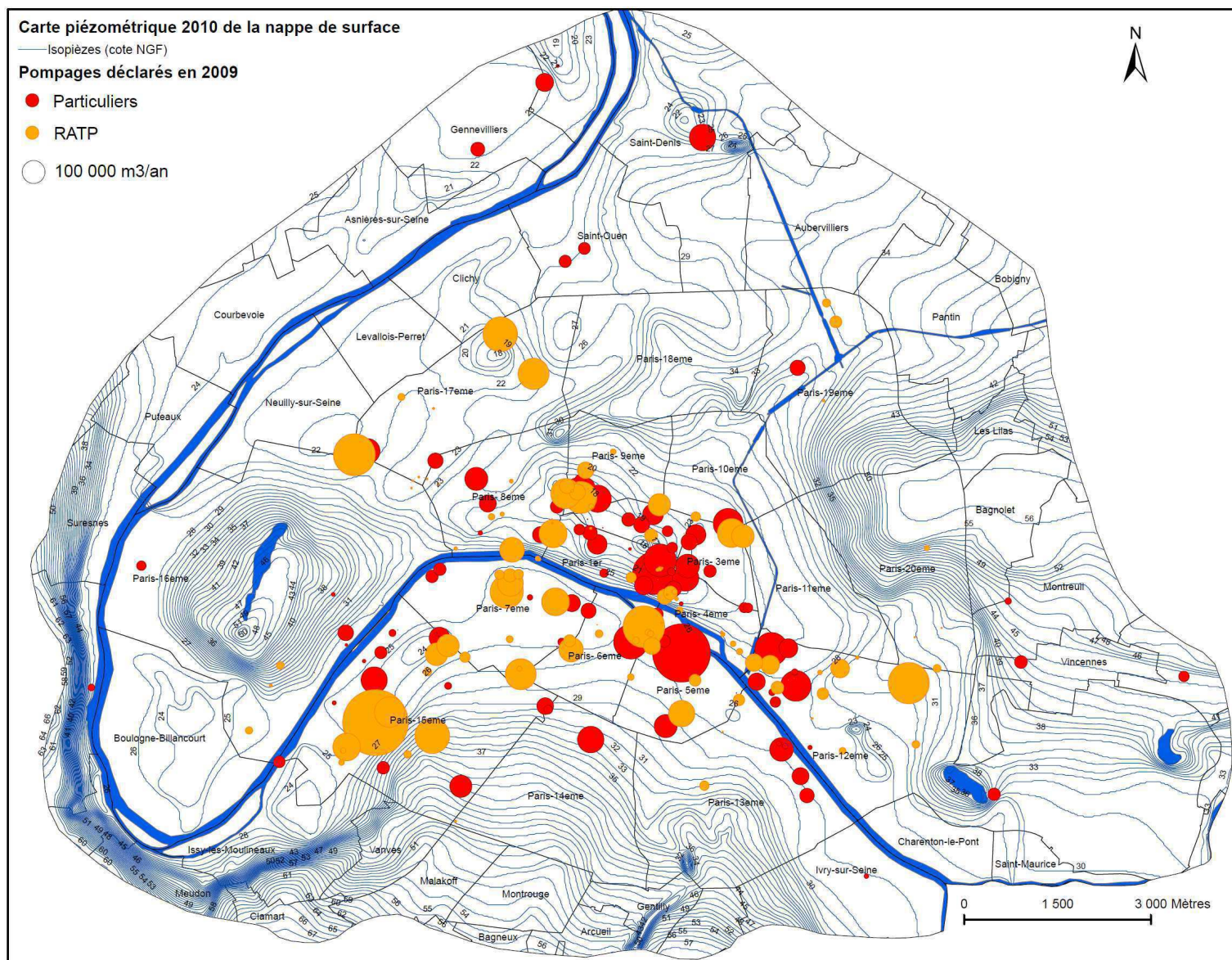


Figure 1. 68: Carte piézométrique de la nappe phréatique à Paris associée aux prélèvements d'eau (2010).







## 2.5. Synthèse du fonctionnement des aquifères parisiens

### 2.5.1. Tentative de bilan sur la zone d'étude

Paris se trouve à peu près au centre du bassin versant de la Seine qui s'étend sur une surface de 78 650 km<sup>2</sup>. La totalité de ce territoire est drainée par la Seine qui reçoit un certain nombre d'affluents (Aube, Yonne, Marne ...). Notre zone d'étude porte sur Paris et sa proche banlieue, le tout sur une superficie de 207 km<sup>2</sup> et ne prend donc en compte qu'une très petite portion du bassin de la Seine. Ainsi, ce secteur ne correspond pas à un bassin versant dont nous pouvons cerner tous les termes du bilan. Il n'est donc pas possible de faire un bilan hydrologique précis. Au vu des évaluations des volumes annuels des entrées et des sorties dans Paris intra-muros recensés précédemment, nous avons tenté une approche globale de ce bilan.

Entrées (millions de m <sup>3</sup> /an)		Sorties (millions de m <sup>3</sup> /an)	
Infiltrations	7,8	Pompages	30
Pertes du réseau d'égouts	32		
Pertes du réseau d'ENP	3		
Alimentations par la Seine	19		
<b>Total entrées</b>	<b>61,8</b>	<b>Total sorties</b>	<b>30</b>

**Tableau 1. 18: Récapitulatif des entrées et des sorties quantifiables sur la zone d'étude.**

Selon le Tableau 1. 18, il existerait une différence de 31,8 millions de m<sup>3</sup>/an entre les entrées et les sorties estimées. Il faudrait donc considérer que ce débit est évacué hors de la zone d'étude par des écoulements souterrains vers le nord-nord-est comme le suggère les cartes piézométriques décrites précédemment.

Les formations aquifères ont une transmissivité globale  $T_g$  de  $6,7 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s estimée d'après les valeurs du Tableau 1. 19. Le débit moyen évacué ( $Q$  en m<sup>3</sup>/s) sur un front d'une longueur  $L$  (18 000 m sur la zone d'étude) sous un gradient hydraulique  $i$  est donné par la formule suivante :

$$Q = T_g \cdot i \cdot L.$$

Cette formule nous conduit à un gradient hydraulique moyen de 8 ‰. Cette valeur nous semble trop élevée par rapport à ce que montrent les cartes piézométriques. En effet, si nous considérons la situation piézométrique de la nappe de l'Yprésien supérieur, nous observons plutôt un gradient hydraulique de 1 ‰. Ceci pourrait indiquer qu'une partie des débits d'eau souterraine est évacuée vers la profondeur, soit la nappe de l'Albien.

	Perméabilité (m/s)	Epaisseur moyenne (m)	Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)
Calcaire de Saint-Ouen	$1,8 \cdot 10^{-4}$	15	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Sables de Beauchamp supérieurs	$1 \cdot 10^{-5}$	7	$7 \cdot 10^{-5}$
Sables de Beauchamp médians	$2,53 \cdot 10^{-7}$	1	$2,5 \cdot 10^{-7}$
Sables de Beauchamp inférieurs	$1,04 \cdot 10^{-5}$	7	$7,3 \cdot 10^{-5}$
Marnes et Caillasses	$3,05 \cdot 10^{-5}$	18	$5,5 \cdot 10^{-4}$
Calcaire Grossier	$3,5 \cdot 10^{-5}$	18	$6,3 \cdot 10^{-4}$
Calcaire Grossier (partie basale)	$3 \cdot 10^{-7}$	4	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Argile de Laon	$8,75 \cdot 10^{-8}$	0 à 2	$1,8 \cdot 10^{-7}$
Sables Supérieurs	$1,1 \cdot 10^{-4}$	17	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Fausses Glaises	$6,6 \cdot 10^{-7}$	8	$5,3 \cdot 10^{-6}$
Sables d'Auteuil	$1 \cdot 10^{-5}$	6,5	$6,5 \cdot 10^{-5}$
Argile Plastique	$2,65 \cdot 10^{-9}$	15	$4 \cdot 10^{-8}$
Marnes de Meudon	$6,5 \cdot 10^{-7}$	9	$5,9 \cdot 10^{-6}$
Craie Blanche de Meudon (partie supérieure)	$4,1 \cdot 10^{-5}$	18	$7,4 \cdot 10^{-4}$
<b>Transmissivité globale (<math>T_g</math> en m<sup>2</sup>/s)</b>			<b><math>6,7 \cdot 10^{-3}</math></b>

**Tableau 1. 19: Récapitulatif des transmissivités de la zone d'étude.**

L'écart entre les entrées et les sorties apparaissant dans le bilan pourrait également s'expliquer par la sous estimation des pompages que nous avons cependant déjà majoré de 60% par rapport aux prélèvements recensés et déclarés. Une autre cause possible serait une mauvaise évaluation des débits échangés avec la Seine. Le chiffre (19 millions de m<sup>3</sup>/an) avancé provient d'une étude de Diffre (1969) qui ne considérait que la Seine dans Paris, au moment où les nappes étaient particulièrement basses.

#### 2.5.2. Rôle de l'Albien sur les nappes parisiennes

A plus de 400 mètres de profondeur, sous la nappe de la craie, nous trouvons la nappe des Sables verts de l'Albien. Ces deux nappes sont séparées par les niveaux inférieurs de la craie qui ont un faible perméabilité ( $10^{-7}$  à  $10^{-8}$  m/s) et l'Argile du Gault ( $K = 10^{-9}$  m/s) présente sur une vingtaine de mètres d'épaisseur.

Dans ce paragraphe, nous cherchons à comprendre si l'écart sur le bilan pourrait s'expliquer par une évacuation partielle de l'eau vers la nappe sous-jacente de l'Albien.

Durant la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle, il était admis que la nappe de l'Albien était uniquement alimentée par ses zones affleurantes situées à l'Est et au Sud-Est du Bassin Parisien et qu'elle s'écoulait parallèlement à l'Yonne puis à la Seine avant d'atteindre deux exutoires dans la Manche. En 1971, Vuillaume apporta des éléments nouveaux en précisant que la nappe de l'Albien, située à environ 600 mètres de profondeur sous Paris, s'alimente partiellement par drainance descendante à partir de dômes piézométriques à travers l'Argile du Gault. Plus récemment, deux études (Raoult, 1999 et AESN 2001) ont démontré une recharge de la nappe de l'Albien par la nappe de la Craie. La première étude estime que le débit est négligeable dans la Bassin Parisien et absente à Paris, alors que pour la seconde il est plus important (Figure 1. 71).

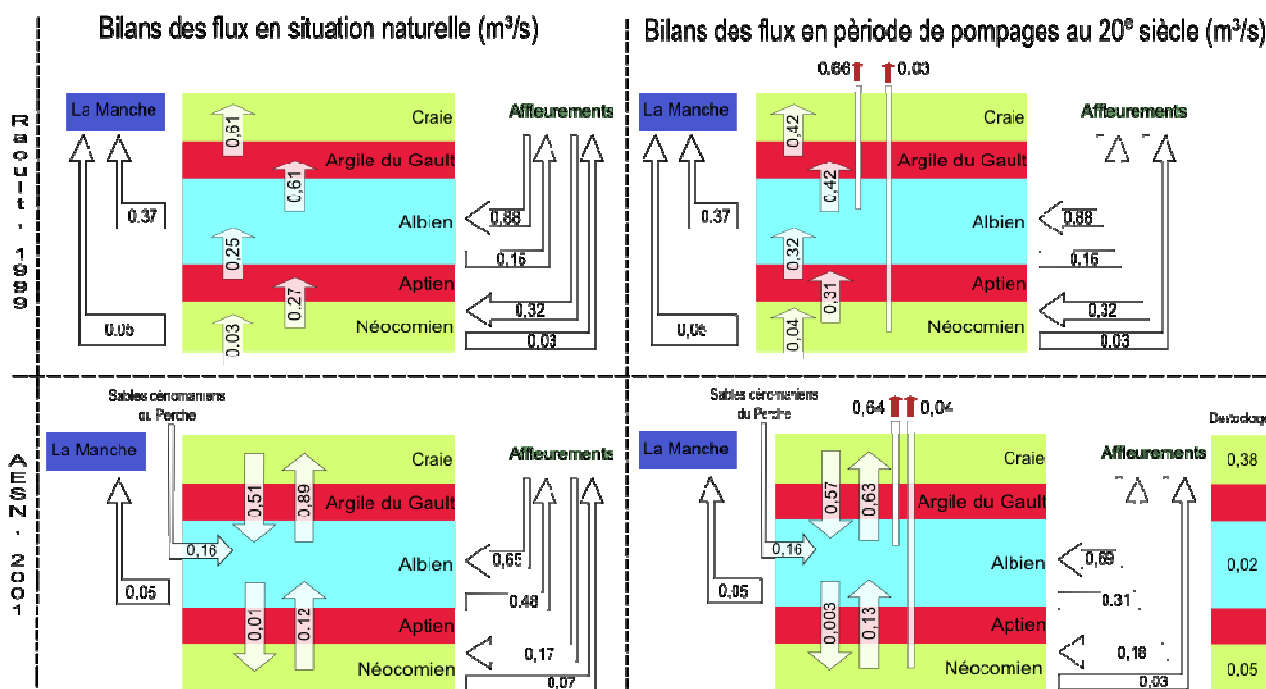


Figure 1.71: Bilans des flux entre les nappes campanienne, albienne et néocomienne en  $m^3/an$ .

La nappe captive de l'Albien est exploitée depuis le milieu du 19<sup>e</sup> siècle, avec un pic de consommation dans les années 1930 (Figure 1.72). Il s'en est suivi une diminution importante du niveau de la nappe (Figure 1.73) provoquant un cône de dépression piézométrique d'une centaine de mètres, localisé en Ile-de-France. Dans les années 2000, suite à une réduction des prélèvements, le niveau semble s'être stabilisé autour de 20 m (cote NGF) à Paris et à une valeur inférieure dans la fosse de Saint-Denis.

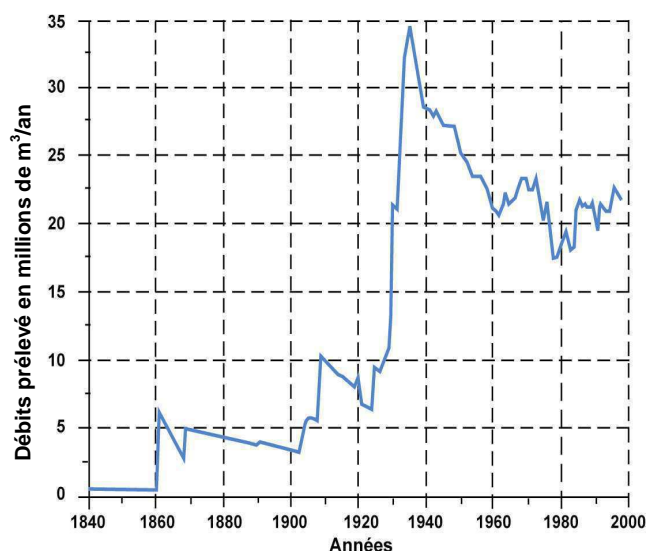


Figure 1.72: Débits d'eau prélevés dans la nappe de l'Albien entre 1840 et 2000.

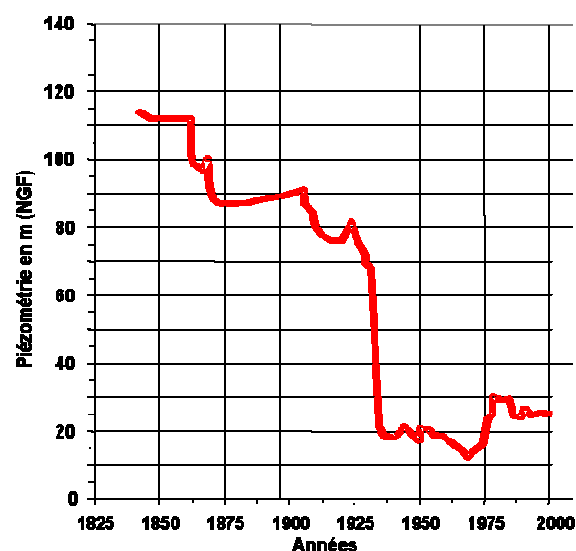


Figure 1.73: Niveau piézométrique de la nappe de l'Albien à Paris 13e entre 1840 et 2000.

L'étude menée par l'AESN en 2001 indique que, bien que séparées par des formations quasi-imperméables, les nappes campanienne, albienne et néocomienne sont interdépendantes et sont



affectées par les prélèvements de la nappe des Sables verts. Toujours selon cette étude, la nappe la plus touchée par l'exploitation albienne dans le Bassin Parisien serait la nappe de la Craie.

En comparant la carte piézométrique de l'Albien (Figure 1. 74) avec la carte piézométrique de la nappe de la Craie (Figure 1. 75) dans le Bassin Parisien, nous remarquons effectivement des niveaux piézométriques relativement proches dans la fosse de Saint-Denis avec des cotes NGF de 20 mètres. Cependant, étant donné l'épaisseur de l'Argile du Gault et la faible perméabilité de la craie en profondeur, le doute subsiste sur le fait que la piézométrie de la craie soit influencée par celle de l'Albien. Il nous paraît ainsi peu probable que la drainance verticale descendante contribue effectivement au bilan des nappes superficielles parisiennes, excepté dans les secteurs présentant d'anciens puits où sondages dans l'Albien mal rebouchés comme dans la Fosse Saint-Denis.

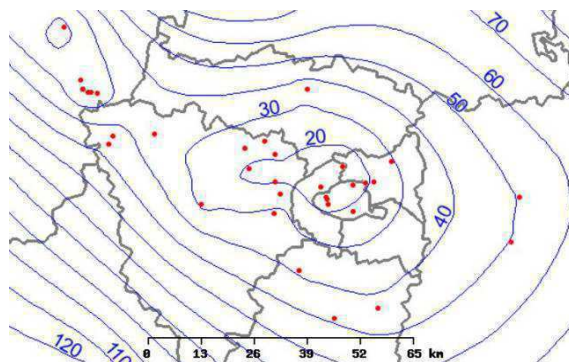


Figure 1. 74: Carte piézométrique de la nappe de l'Albien (Vernoux et al. 1997).

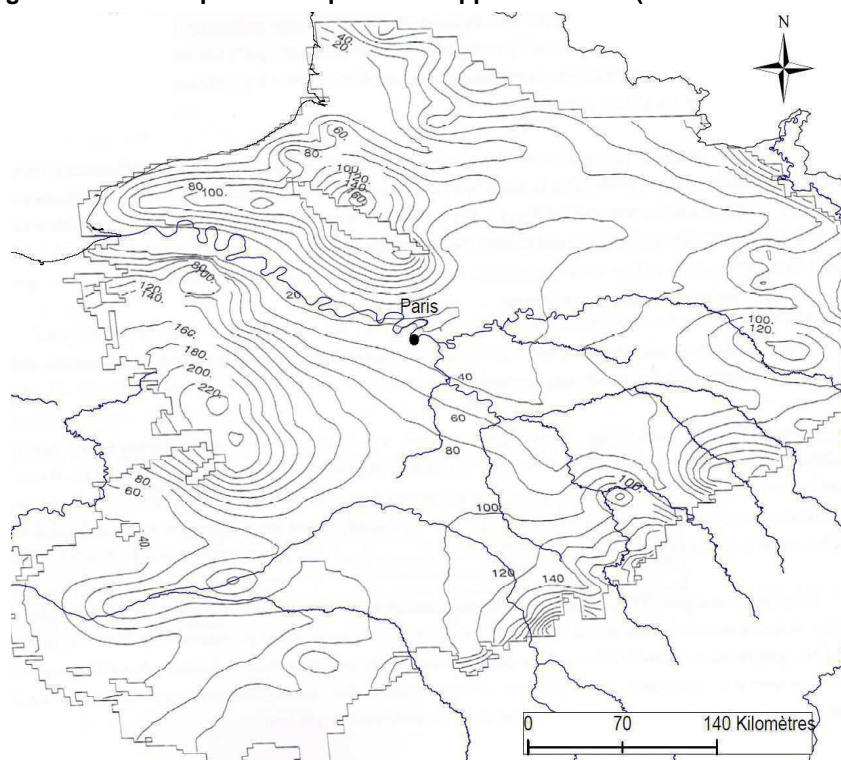
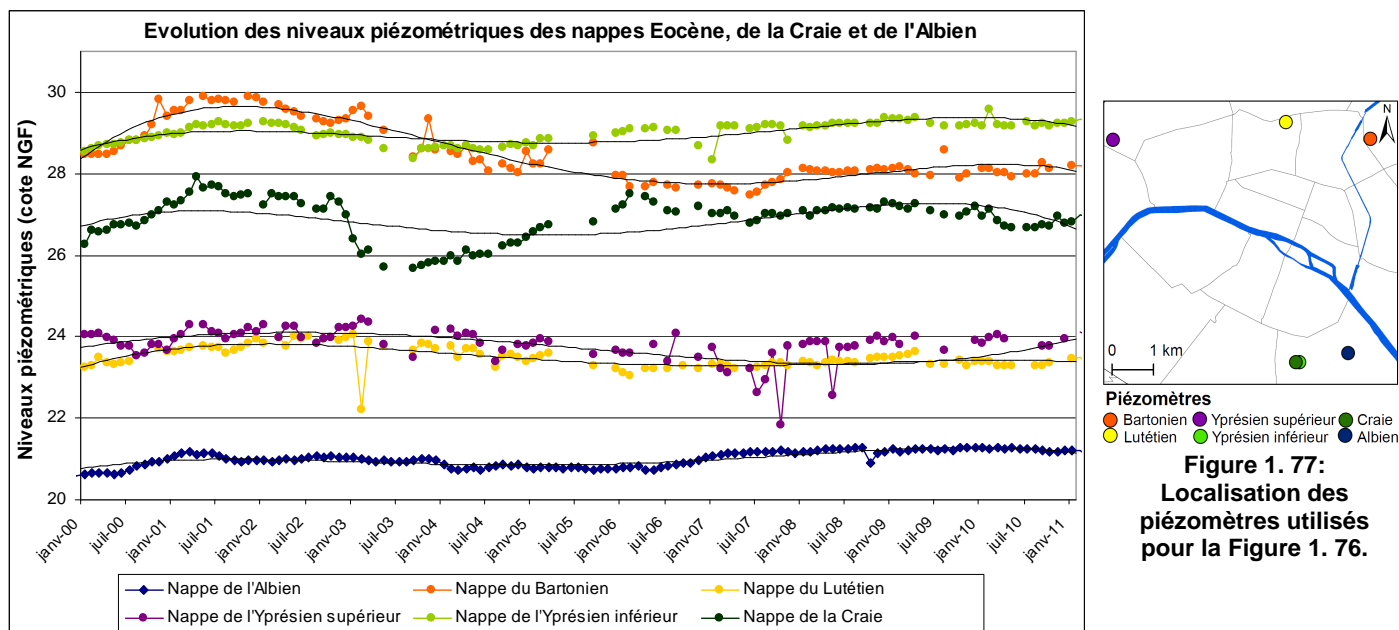


Figure 1. 75: Carte piézométrique de la nappe de la Craie réalisée par Raoult (1999) avec des données piézométriques issues d'Albinet (1967).

### 2.5.3. Relations des nappes parisiennes entre elles

Afin de comparer le niveau des nappes entre elles, nous avons réalisé un graphique retraçant l'évolution des nappes éocènes, campanienne et albienne (Figure 1. 76) entre janvier 2000 et décembre 2010. Les piézomètres utilisés sont tous situés à une certaine distance de la Seine pour ne pas subir ses effets et possèdent des chroniques suffisamment complètes pour en suivre leur évolution. Cela explique leur répartition géographique (Figure 1. 77). Certains piézomètres ont enregistré des variations piézométriques résultant de prélèvements d'eau temporaires comme c'est le cas pour la nappe peu profonde de l'Yprésien supérieur. La nappe de la Craie présente également une perturbation relativement longue qui s'étend de janvier 2003 à janvier 2006 qui reflète l'existence probablement d'un chantier important. En effet, la construction de la ligne de métro entre la station de la BNF et Olympiade a eu lieu à proximité durant cette même période. Des piézomètres au Lutétien ont mesurés des baisses de niveaux comprises entre 1,5 et 5 m cohérentes avec celles observées au même moment dans la craie dans un secteur où l'argile plastique est relativement mince. Nous noterons également que le piézomètre du Lutétien situé à proximité de la fosse de Saint-Denis, montre une cote piézométrique plus basse que les autres.



**Figure 1. 76: Evolution des niveaux piézométriques des nappes Eocènes, de la Craie et de l'Albien entre 2000 et 2010.**

L'allure générale des courbes piézométriques de la Figure 1. 76, y compris celle de l'Albien, présente trois phases, plus ou moins marquées. La première s'étend de janvier 2000 à janvier 2004 et révèle une période où les nappes sont globalement hautes. Durant la seconde, de février 2004 à juillet 2006, les nappes présentent des niveaux piézométriques plus bas. Enfin, d'août 2006 à janvier 2011, les niveaux piézométriques remontent. Ces variations piézométriques générales sont vraisemblablement le reflet du contexte hydrogéologique régional marquées par des périodes de hautes et basses eaux. Sur ces variations lentes, viennent se superposer des perturbations brèves qui sont le reflet du contexte urbain.

### 3. Bâti souterrain et nappes

Depuis plus d'un siècle, la ville de Paris a vu son sous-sol s'urbaniser fortement pour se transformer en véritable gruyère encombré pour 19 % de la surface du sol par différentes structures. En plus des 270 kilomètres de galeries dans les carrières de Calcaire Grossier et de gypse, un certain nombre de bâtiments (caves, réservoirs souterrains, centres commerciaux, musées, parkings résidentiels et parkings concédés par la Ville de Paris...) occupent le sous-sol parisien alors que différents réseaux (métro, RER, réseau d'assainissement, chauffage urbain, gazoducs, oléoducs...) serpentent sur plusieurs milliers de kilomètres. En plus de cela, il faut ajouter d'autres réseaux comme les câbles EDF, Ethernet qui ne sont pas toujours précisément cartographiés ce qui oblige à des reconnaissances avant chaque chantier afin d'éviter les incidents.

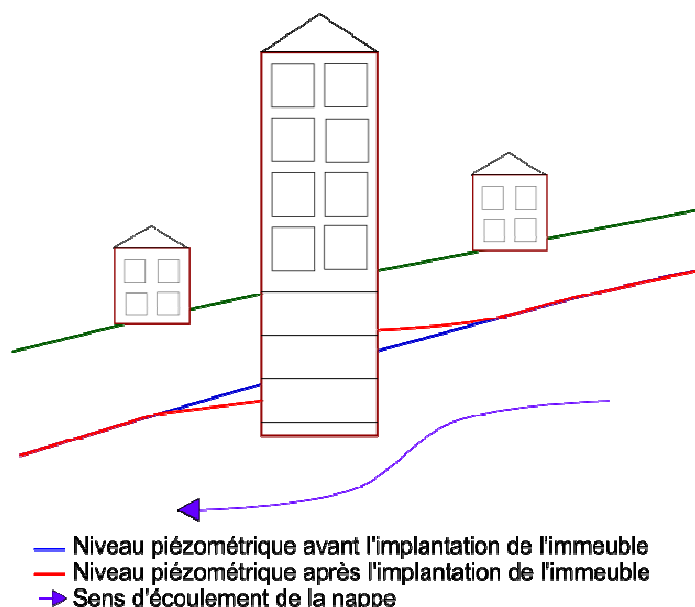


Figure 1. 78: Schéma de l'écoulement d'une nappe en présence d'une infrastructure souterraine.

Au vu de cette longue liste d'infrastructures présentes dans le sous-sol parisien, nous ne nous intéresserons qu'à celles qui sont susceptibles de perturber les écoulements souterrains.

Ces perturbations se traduisent généralement par une augmentation du niveau piézométrique en amont de la structure souterraine, et une diminution en aval (Figure 1. 78). De ce fait, le sens d'écoulement local de la nappe est lui-même modifié.

#### 3.1. Structures souterraines en interaction avec les nappes

La majorité des ouvrages souterrains parisiens est construit pour des raisons techniques et financières hors des nappes. Les premières structures interférant avec les nappes virent le jour avec le développement des parois moulées et des injections de coulis dès le début du 20<sup>e</sup> siècle.

##### 3.1.1. Métro, Réseau Express Régional et stations

La première ligne de métro parisien fut mise en service pour l'exposition universelle de 1900, et depuis le réseau ne cesse d'évoluer pour rejoindre les villes limitrophes de la capitale. A ce jour, il est composé de 14 lignes qui s'étendent sur 213 km avec 197 km situés sous la surface du sol dont 38 km dans les nappes (Figure 1. 79).

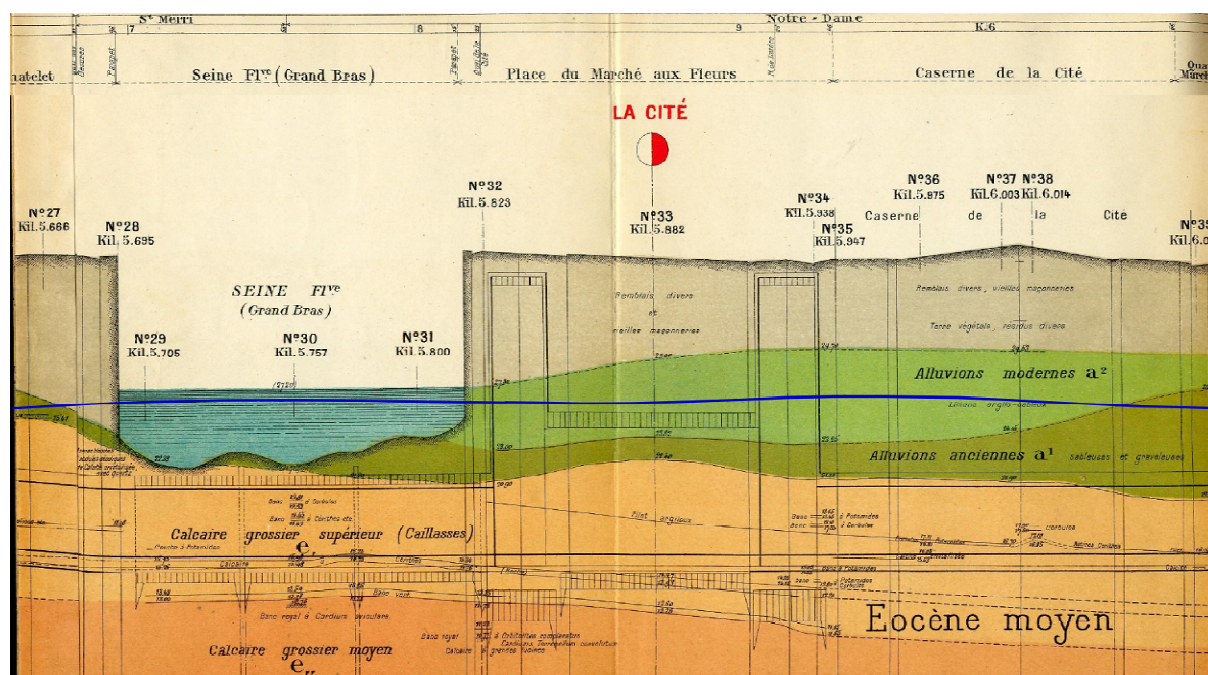


Figure 1. 79: Coupe géologique (source RATP) de la ligne 4 et de la station « la Cité » à son passage sous la Seine associée au niveau piézométrique de 2010 de la nappe des alluvions anciennes.



Figure 1. 80: Construction de la ligne 14 traversant la nappe du Lutétien sous la place Lachambeaudie (photo : RATP).

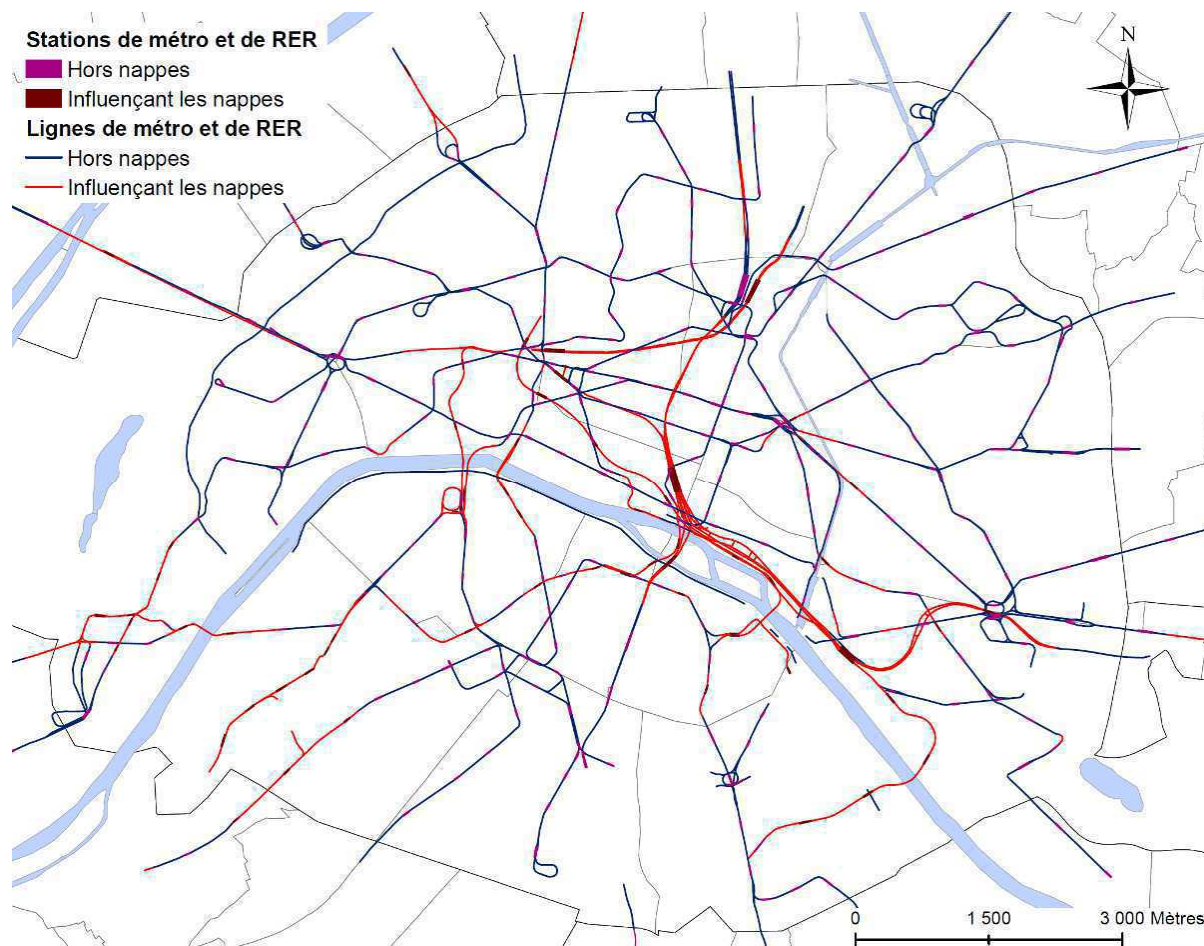
Les tunnels du métro ont un diamètre moyen de 5 m et sont situés à une profondeur généralement proche de 10 m. Quelques secteurs sont plus profonds comme au niveau de la place Denfert-Rochereau (15 m de profondeur pour la ligne 6 ou sous la rue de Ravignan dans le 18<sup>e</sup> arrondissement (50 m de profondeur pour la ligne 12). La ligne 14, dernière née du réseau du métro (ouverture en 1998), possède des tunnels plus larges d'un diamètre de 8,6 m et se trouve à une profondeur moyenne de 25 m. Elle interfère de ce fait avec la nappe du Lutétien (Figure 1. 80).

Le Réseau Express Régional ou RER, géré par la RATP et la SNCF, possède 5 lignes qui desservent l'agglomération parisienne. Dans le sous-sol de la capitale, les RER serpentent sur 66 km, dont 24 km interfèrent directement avec les nappes. Les tunnels ont un diamètre interne de 9 mètres et leurs radiers peuvent descendre jusqu'à 35 m de profondeur, ce qui est le cas du RER E.

Il existe à Paris 337 stations ferroviaires souterraines (en comptabilisant les stations abandonnées) dont 76 interfèrent avec les nappes. Certaines stations ont une influence plus importante que les autres sur l'écoulement des nappes. Par exemple, la station Haussmann-Saint-Lazare du RER E (anciennement Condorcet), qui se trouve à une trentaine de mètres de profondeur, recoupe à la fois les nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur sur 20 m de hauteur.



Les ouvrages ferroviaires qui interfèrent directement avec les nappes se localisent principalement au centre de Paris en rive droite de la Seine et en bordure du fleuve dans les alluvions anciennes. Les structures qui influencent les nappes dans les autres zones se trouvent à des profondeurs plus importantes (Figure 1. 81).



**Figure 1. 81: Stations et lignes de transport ferroviaire qui interfèrent avec les nappes.**

L'identification des structures ferroviaires, interférant avec les nappes, a pu se faire grâce à la mise à disposition de la part de différents services (RATP, IGC, Archives de Paris) des coupes géologiques et des coupes d'implantation de ce réseau. Par la suite il a fallu identifier la profondeur des 259 km de tunnels et la cote du radier des 337 stations souterraines. Pour finir, nous avons recoupé ces structures avec les formations géologiques et mentionné si elles pénétraient dans les nappes

### 3.1.2. Bâtiments souterrains

Le tout premier bâtiment souterrain profond interférant avec les nappes fut construit en 1927. Il s'agit de la Banque de France qui descend à 27 mètres de profondeur pour atteindre la cote NGF de 10 m en recoupant la nappe du Lutétien. Depuis, les structures souterraines immergées dans les nappes n'ont pas cessé de se multiplier.

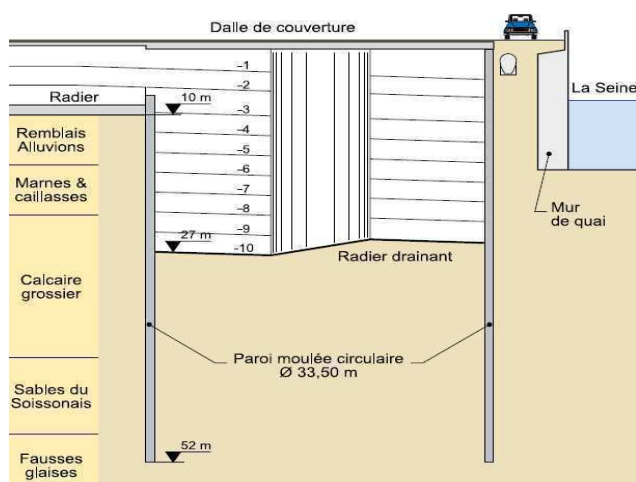
#### → Parkings privés et caves

En 2008, 20 021 structures souterraines furent déclarées à la Direction Générale des Finances Publiques parisiennes (Taxe d'habitation). Ces déclarations font mention de 12 422 caves et 7 599 parkings privés et indiquent le nombre de niveaux de sous-sols. Il semblerait cependant que le nombre exact de niveaux souterrains ne soit pas toujours convenablement déclaré et que les objets ne possèdent pas toujours la bonne dénomination. Ainsi certains parkings sont déclarés comme étant des caves.

Afin de localiser les parkings et caves, nous avons, dans un premier temps, associé l'adresse de la structure souterraine du fichier des Impôts locaux, au plan d'un bâtiment. Une fois ces structures identifiées, nous avons estimé que chaque parking résidentiel et cave se trouve au droit de l'immeuble auquel il appartient. Concernant la profondeur, nous avons considéré, que chaque niveau souterrain de cave ou parkings possède une hauteur moyenne de 3 mètres, bien que certains niveaux de sous-sol aient des hauteurs supérieures où inférieures à 3 mètres. Enfin, connaissant la topographie de Paris, et ayant identifié géographiquement tous les parkings et caves, nous avons pu estimer la cote NGF de chaque radier des dépendances souterraines d'immeuble.

En recoupant ces données avec le niveau piézométrique des nappes, nous avons déterminé quels sont les parkings privés et caves possédant un radier recoupant les nappes ainsi, que la hauteur d'eau dans laquelle baigne les fondations de chaque immeuble. Ainsi, à Paris, nous recensons 480 parkings résidentiels et 120 caves dans cette situation.

#### → Parkings publics



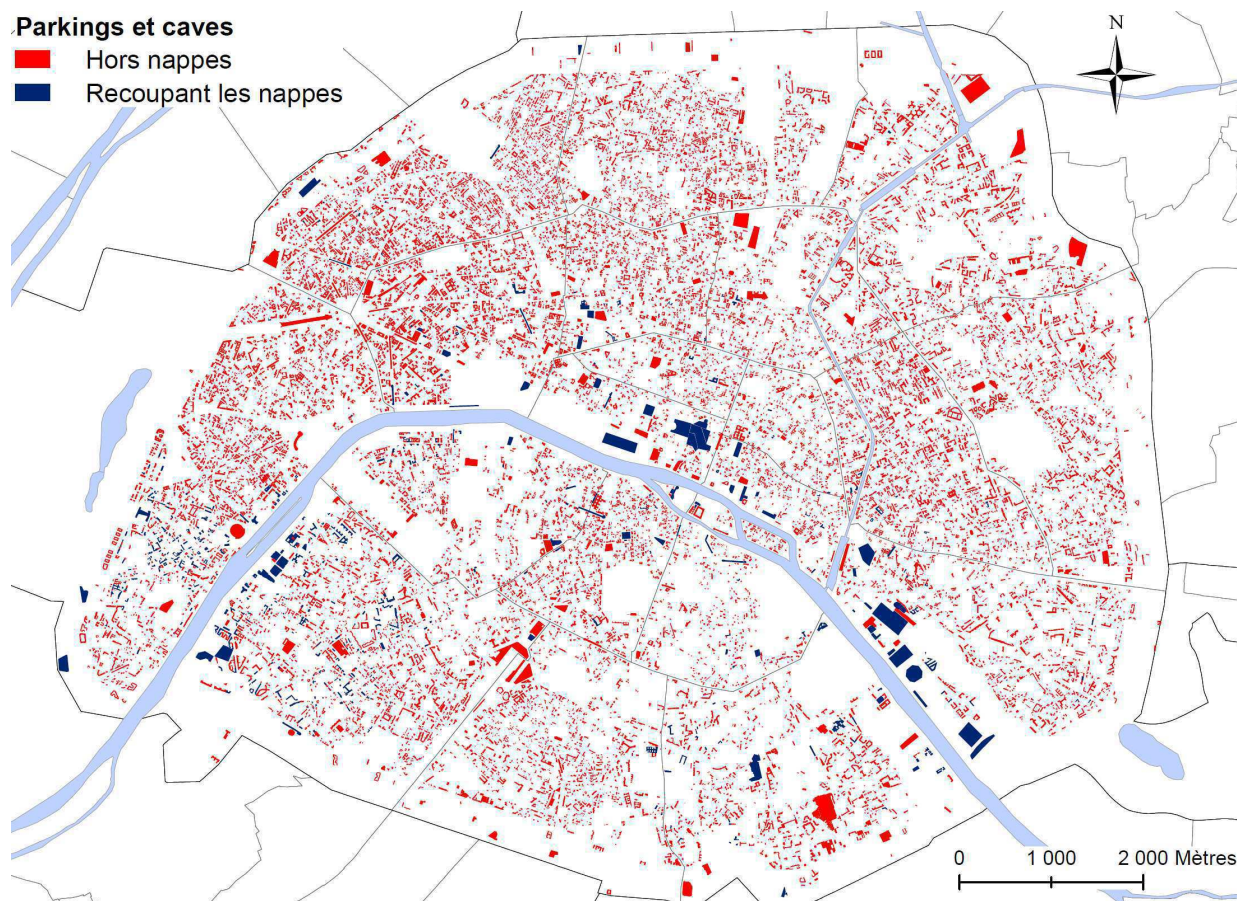
Il existe dans la capitale 147 parkings souterrains concédés par la Ville de Paris à différents délégataires. Ces parkings, qui sont généralement plus étendus géographiquement que les parkings résidentiels, peuvent descendre à des profondeurs importantes, comme c'est le cas du parking Harlay (Île de la Cité) qui possède 10 niveaux de sous-sols et une paroi moulée circulaire atteignant les Fausses glaises à 52 m de profondeur (Figure 1. 82).

La cartographie de ces parkings fut réalisée à partir des 86 plans disponibles, que nous avons géoréférencés. Un polygone a ensuite été tracé pour représenter chaque parking auquel nous avons associé une cote de radier. Les 61 parkings qui ne possédaient pas de plans, furent cartographiés avec moins de précision et nous leurs avons attribué une hauteur de 3 mètres par niveaux



souterrains. En comparant la cote des fondations des parkings publics avec la cote piézométrique de la première nappe rencontrée, nous avons déterminé le nombre de ces structures souterraines qui interfèrent avec les nappes. Il s'élève à 56.

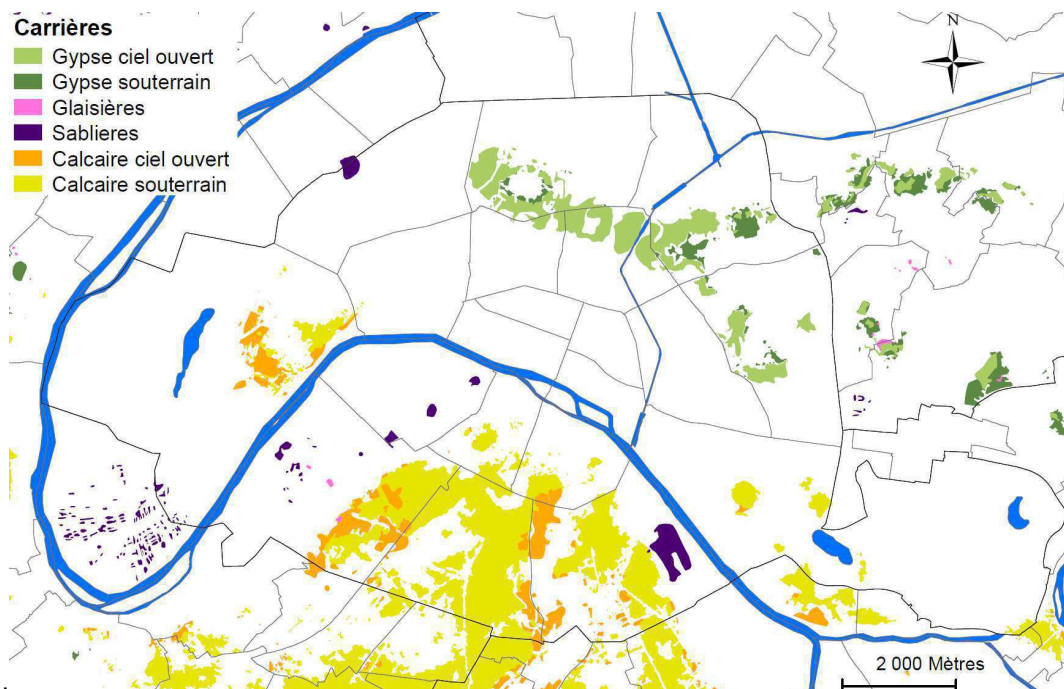
En rassemblant les parkings privés, les parkings publics et les caves, nous obtenons un nombre total de 656 structures souterraines qui recoupent les formations aquifères (Figure 1. 83).



**Figure 1. 83: Parkings et caves déclarés en 2009 à l'administration fiscale interférant avec les nappes dans la situation piézométrique de 2010.**

### 3.1.3. Carrières

La Ville de Paris est soumise par d'anciennes carrières souterraines exploitées depuis le XII<sup>e</sup>. L'extraction du calcaire lutétien a cessé en 1812, dans Paris intramuros et en 1860 pour la carrière du Bois de Vincennes qui était jusque-là rattachée à la commune de Saint-Maurice (Figure 1. 84 et Annexe 1. 45), Quant au gypse ludien son exploitation souterraine dans Paris a cessé en 1779 (Annexe 1. 46). Les carrières souterraines occupent aujourd'hui 10,4 km<sup>2</sup> à Paris, soit presque 10 % de la superficie pour les carrières de calcaire et 0,7 % pour les carrières de gypse.



**Figure 1. 84: Cartographie des carrières parisiennes.**



**Figure 1. 85: Puits en carrière dans Nappe du Lutétien (bain des carriers).**

Durant l'exploitation du sous-sol parisien, les carrières stoppaient, sauf exception, l'extraction du calcaire en profondeur avant de rencontrer la nappe du Lutétien (Figure 1. 85). Ainsi les carrières n'atteignent pas les zones saturées et s'arrêtent juste avant. L'eau est donc absente dans les carrières excepté dans certains cas, notamment lorsque des fuites de réseaux sont présentes (Figure 1. 86) et font remonter localement le niveau piézométrique.

Bien que les carrières occupent un volume de vides important à Paris, leur relation avec les nappes sous-jacentes se borne à modifier l'infiltration des eaux de pluie, des eaux de ruissellement et des eaux provenant des fuites des réseaux.



**Figure 1. 86: Fuites de réseaux en carrière (photo A. Lamé et IGC).**



### 3.1.4. Autres structures souterraines pouvant influencer les nappes

Hormis le réseau de transport ferroviaire, les parkings et les caves, il existe d'autres structures qui peuvent intervenir sur les nappes. Nous citerons quelques exemples ci-dessous.

Le centre commercial du Forum des Halles dans le 1<sup>er</sup> arrondissement est implanté à 360 m de la Seine et est protégé par un rideau d'injection qui descend jusqu'au toit des Sables de Cuise (Figure 1. 87). Toute la structure s'appuie sur un radier drainant en fond de fouille constitué d'une membrane étanche et de béton drainant. Le calcaire sous-jacent est parcouru par un réseau de drains verticaux et horizontaux qui limite la pression hydraulique au niveau des fondations (Hydratec, 2003). Cet ensemble, constitué du Forum des Halles et des stations RER, recoupe à la fois la nappe du Lutétien et la nappe de l'Yprésien supérieur. Cette structure perturbe profondément l'écoulement des nappes par les prélèvements importants d'eau qui s'y font et sous l'effet du rideau d'injection qui crée un barrage hydraulique.

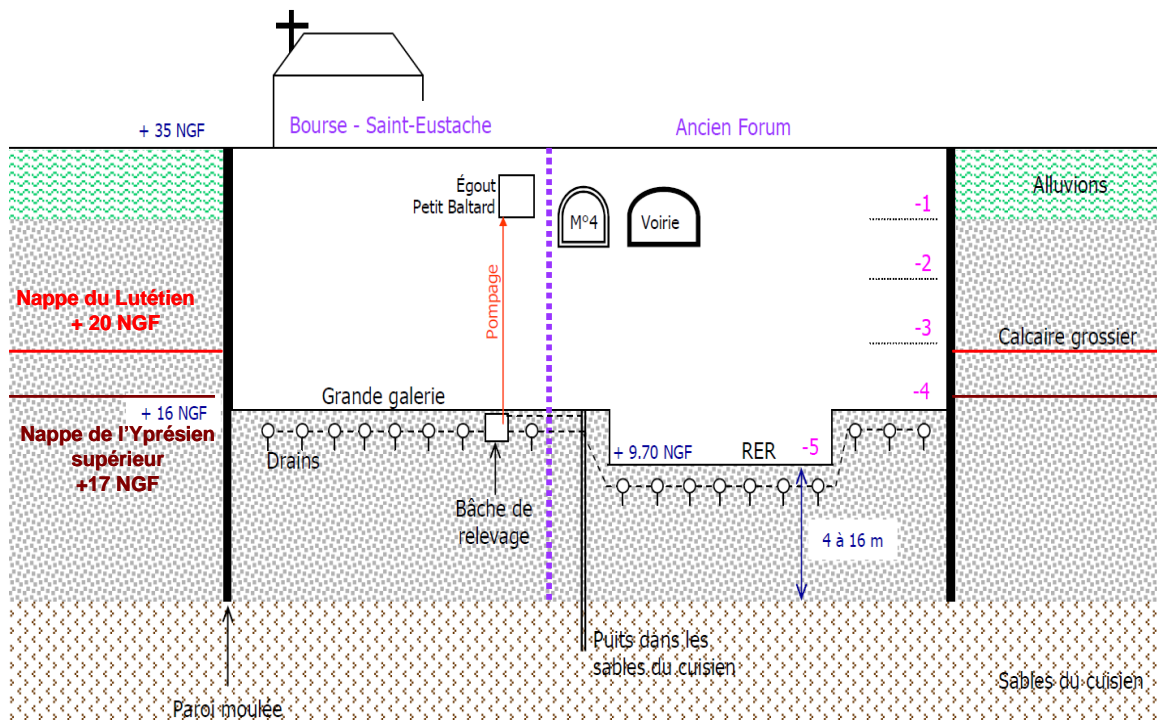
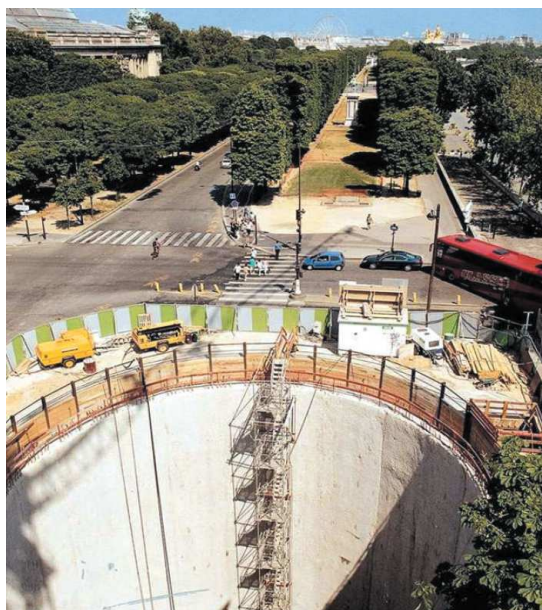


Figure 1. 87: Schéma du forum des Halles avec les niveaux piézométriques des nappes en 2010 (source: Hydratec).

Dans le 7<sup>e</sup> arrondissement parisien, il existe depuis 2006, à quelques dizaines de mètres de la Seine le musée du quai Branly. Afin de limiter les effets du fleuve et de la nappe de l'Yprésien inférieur, une paroi moulée ceinturant le bâtiment sur une longueur de 750 m et sur une profondeur comprise entre 20 m et 30 m est ancrée dans l'Argile Plastique. Dans cette zone, la structure perturbe l'écoulement de la nappe des Sables d'Auteuil et de la nappe des alluvions anciennes.



**Figure 1. 88: Centrale (photo Solétanche Bachy).**

Depuis 2003, il existe cours Albert 1<sup>er</sup> dans le 8<sup>e</sup> arrondissement, un puits circulaire contenant une centrale de climatisation (société Climespace) à quelques dizaines de mètres de la Seine (Figure 1. 88). Cette structure, d'un diamètre de 21 m, contient 5 niveaux souterrains qui s'ancrent grâce à des parois moulées dans les Argiles plastiques à 38 m de profondeur. La circulation de la nappe lutétienne et des nappes yprésiennes est ainsi modifiée localement.

La centrale frigorifique du palais de Tokyo, ancrée grâce à des micropieux jusqu'à 12 m de profondeur, perturbe également, depuis 2005, l'écoulement de la nappe du Lutétien.

Il existe à Paris beaucoup d'autres structures de grande envergure qui perturbent les nappes comme le Centre Pompidou (Diffre, 1975), des tunnels routiers (passage souterrain sous le cours de la Reine, portion du boulevard périphérique sous le Bois de Boulogne) et même une galerie téléphonique sous la Seine atteignant une profondeur de 31 m reliant la place du Chatelet à la place Saint-Michel.

#### 3.1.5. Interactions entre les structures souterraines et les nappes

Le sous-sol parisien est donc fortement urbanisé. Il faut ajouter à la liste précédente les anciennes enceintes fortifiées, comme l'enceinte de Charles V qui épouse la limite N-E des alluvions anciennes, les réservoirs d'eau de Paris, les gazoducs, les oléoducs, les égouts, des bâtiments militaires (anciens bunkers, bâtiments de défense ...), divers réseaux qui ne sont pas toujours dans les égouts (Climespace, CPCU)...

En comptabilisant toutes les infrastructures souterraines du Tableau 1. 20, nous obtenons un taux d'occupation rapporté à la surface du sous-sol parisien proche de 20% (bois de Vincennes et de Boulogne compris), et de 1,6 % pour les ouvrages qui interfèrent avec la nappe dans leur situation piézométrique de 2010 (Figure 1. 89). Nous remarquons que 14 % de la superficie des structures souterraines baignent aujourd'hui dans la nappe phréatique, alors que dans une situation piézométrique considérée comme naturelle, correspondant à la carte piézométrique de Delesse en 1858, 28,4 % des structures souterraines baigneraient dans la nappe.

Type de Structures souterraines	Nombre de structures hors nappes	Superficie des structures hors nappe (m <sup>2</sup> )	Occupation structures parisiennes dans le sous-sol (%)	Nombre de structures dans les nappes	Superficie des structures dans les nappes (m <sup>2</sup> ) en 2010	Occupation structures parisiennes dans les nappes (%) en 2010	Pourcentages des structures souterraines interférant dans l'écoulement des nappes selon la piézométrie de 1858	Pourcentages des structures souterraines interférant dans l'écoulement des nappes selon la piézométrie à l'étiage de 2010
Parkings privés	7 599	4 311 344	4,1 %	480	413 562	0,4 %	25,2 %	9,6 %
Parkings publics et divers	147	1 023 026	1,0 %	56	431 118	0,4 %	61,6 %	42,1 %
Caves	12 422	3 929 291	3,7 %	120	81 172	0,1 %	5,4 %	2,1 %
Stations de RER et de métro	378	1 122 671	1,1 %	66	288 031	0,3 %	46,5 %	25,7 %
Métro	197 km	1 065 000	1,0 %	38 km	228 000	0,2 %	48,7 %	21,4 %
RER	66 km	594 000	0,6 %	24 km	216 000	0,2 %	74,6 %	36,4 %
Carrières de calcaire		7 680 451	7,3 %	0	0	0,0 %	-	-
Carrières de gypse		676 094	0,6 %	0	0	0,0 %	-	-
<b>Total</b>		<b>20 401 877</b>	<b>19,4 %</b>		<b>1 677 704</b>	<b>1,6 %</b>	<b>28,4 %</b>	<b>13,8 %</b>

Tableau 1. 20: Tableau comparatif entre les infrastructures recoupant les nappes et les infrastructures hors nappe.

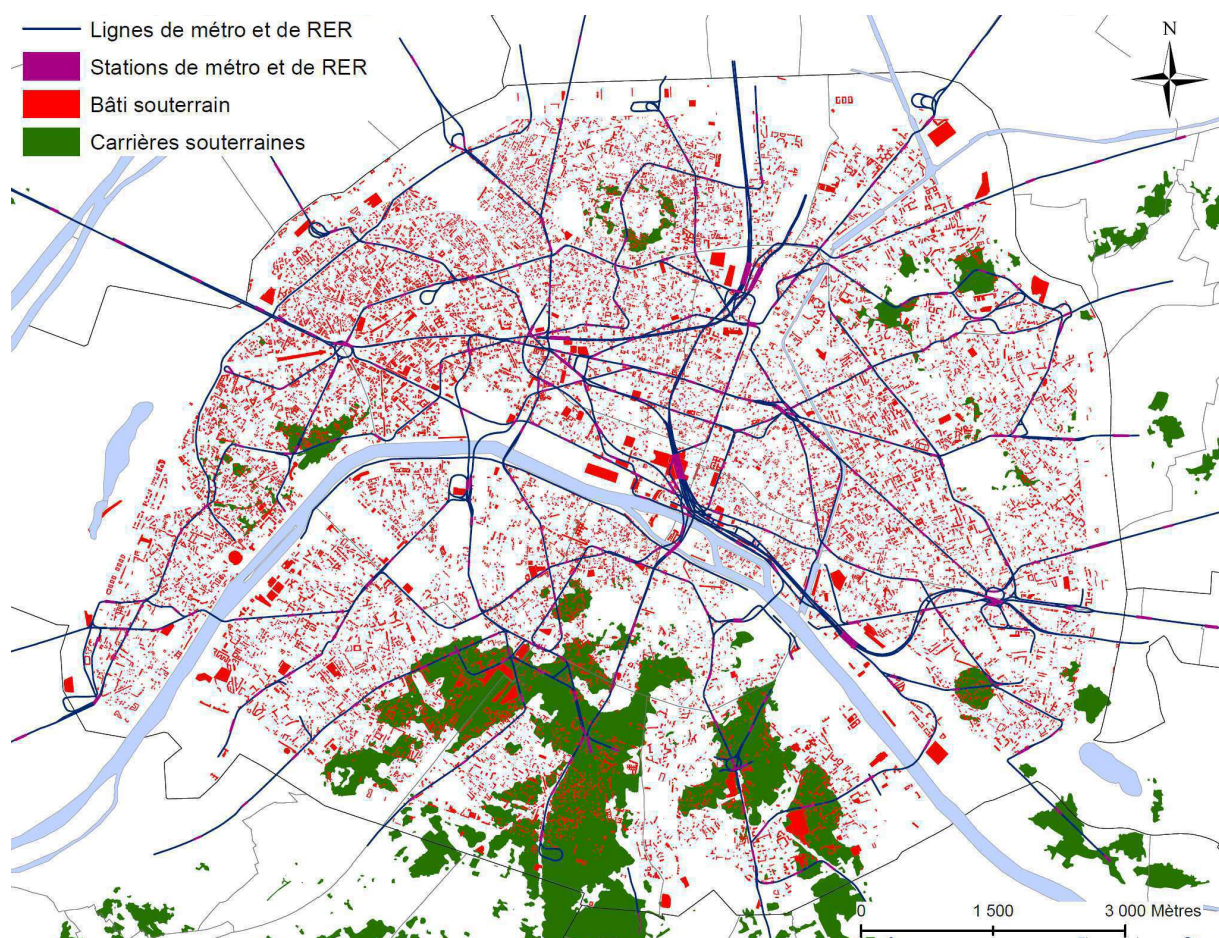
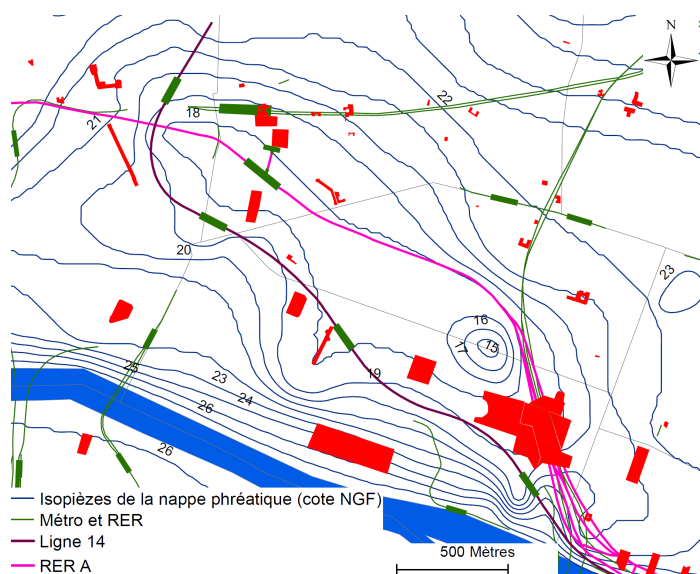


Figure 1. 89: Carte d'occupation du sous-sol parisien.



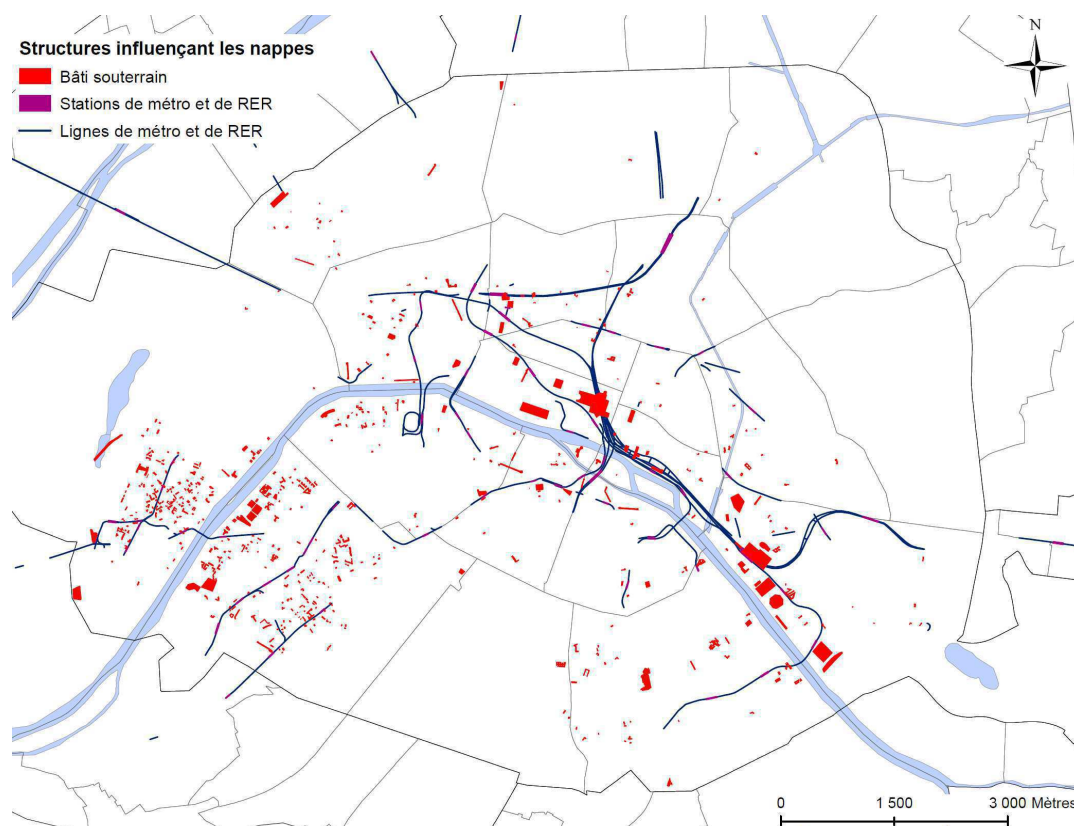
La superficie de ces ouvrages souterrains qui modifient l'écoulement des nappes est de 1,6 km<sup>2</sup>, et sont implantées principalement dans les alluvions anciennes (Figure 1. 91 Figure 1. 92).



**Figure 1. 90: Carte des infrastructures souterraines et piézométrie au centre de la rive droite.**

En comparant la localisation des infrastructures souterraines avec la carte piézométrique de la nappe phréatique, nous remarquons une concordance de la présence des ouvrages avec les niveaux piézométriques bas. Cette situation est particulièrement flagrante entre le forum des Halles et la gare Saint-Lazare, dans la portion délimitée par la ligne 14 et le RER A. Une explication possible réside dans le fait que lorsque les fondations d'un bâtiment sont implantées dans les nappes, il peut être nécessaire de pomper afin de garantir une certaine stabilité de l'ouvrage.

Ainsi, les dépressions piézométriques peuvent résulter de pompages associés à des structures profondes qui limitent les apports horizontaux en créant des zones fortement imperméabilisées qui compartimentent les aquifères. Ce cas semble exister dans le secteur de la Figure 1. 90.



**Figure 1. 91: Carte des infrastructures souterraines interférant avec l'écoulement des nappes dans leur situation piézométrique de 2010.**



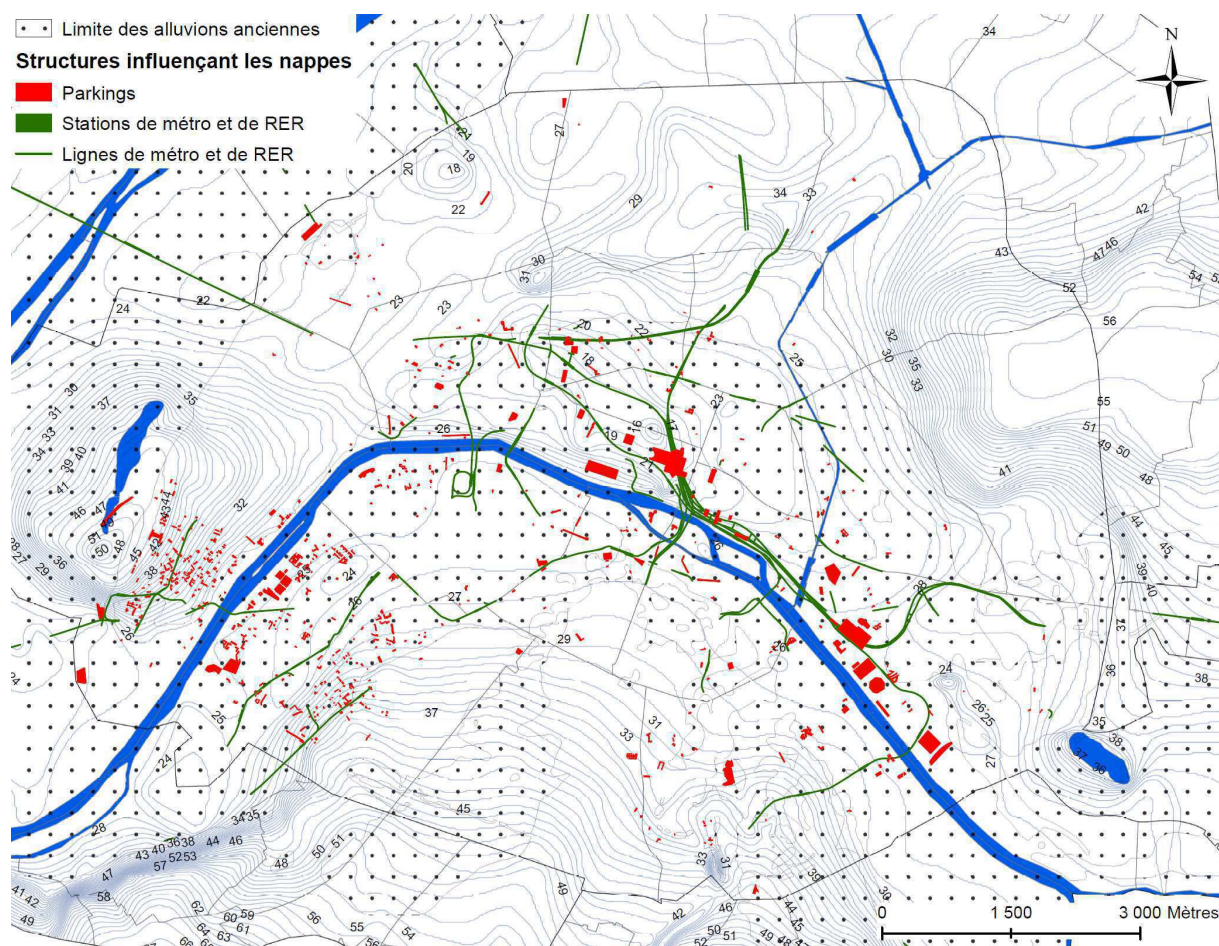


Figure 1. 92: Carte des infrastructures souterraines associées à la piézométrie de la nappe phréatique.

### 3.2. Désordres sur le patrimoine bâti provoqués par les nappes

Comme nous avons pu le décrire précédemment, les nappes parisiennes sont, sous l'effet de l'urbanisation intense de Paris, très fortement perturbées (Figure 1. 93).

Ces perturbations résultent de plusieurs facteurs qui sont :

- Une forte imperméabilisation du sol qui diminue considérablement les zones de recharge des nappes.
- Des prélèvements d'eau difficilement quantifiables et importants dans les formations aquifères. Ils modifient localement l'écoulement des nappes en favorisant une alimentation par la Seine.
- Des infrastructures souterraines de grande ampleur qui agissent comme de véritables barrages hydrauliques. Les circulations des nappes en sont perturbées.

Toutes ces perturbations, qui modifient les niveaux piézométriques et le régime d'écoulement souterrain des nappes, ont des répercussions importantes sur le bâti. Elles peuvent se traduire par une diminution de la portance des sols, une modification des caractéristiques géotechniques des fondations d'immeubles et des inondations.

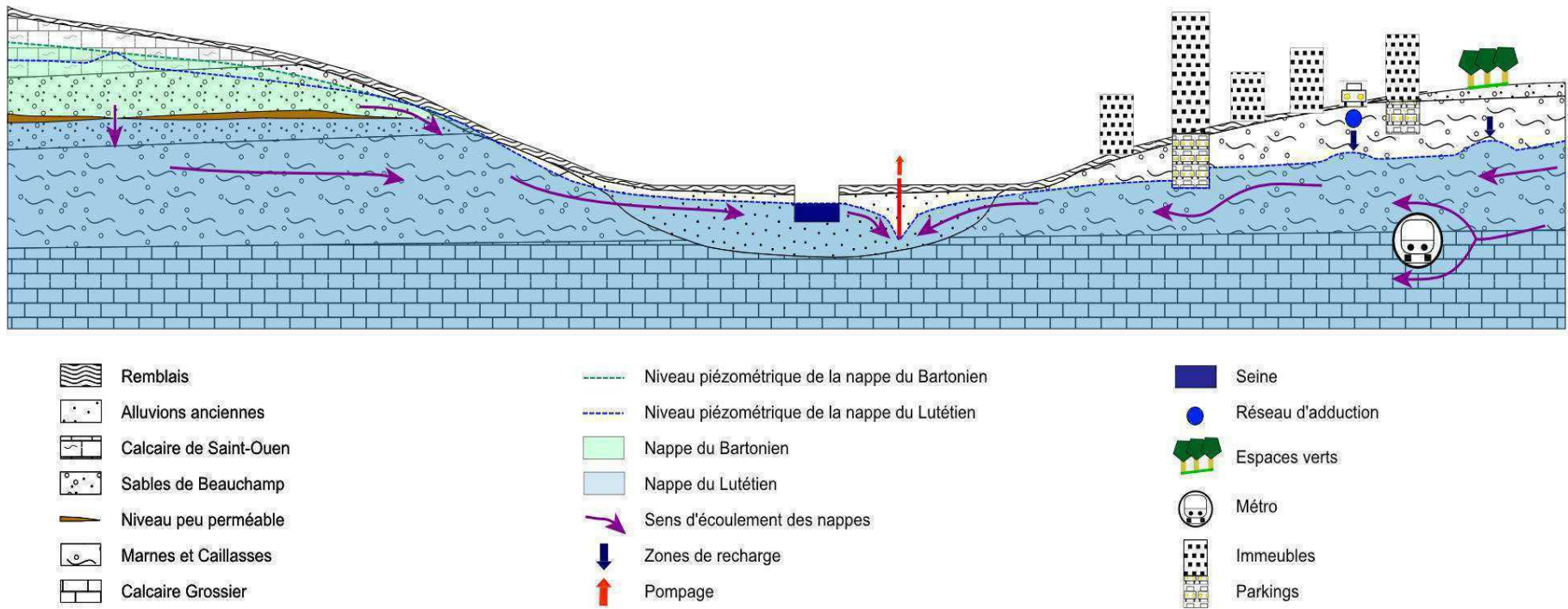
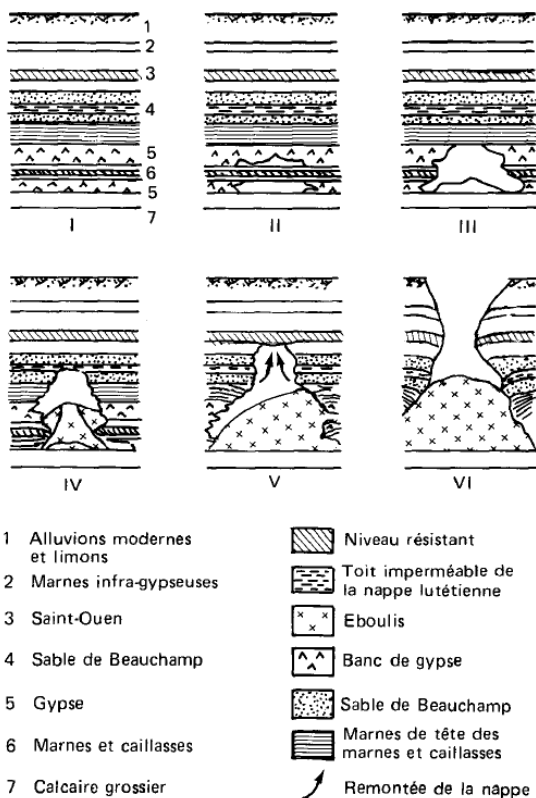


Figure 1. 93: Schéma de l'influence du bâti et de l'occupation du sous-sol sur l'écoulement des nappes à Paris.

### 3.2.1. Dissolution du gypse antéludien

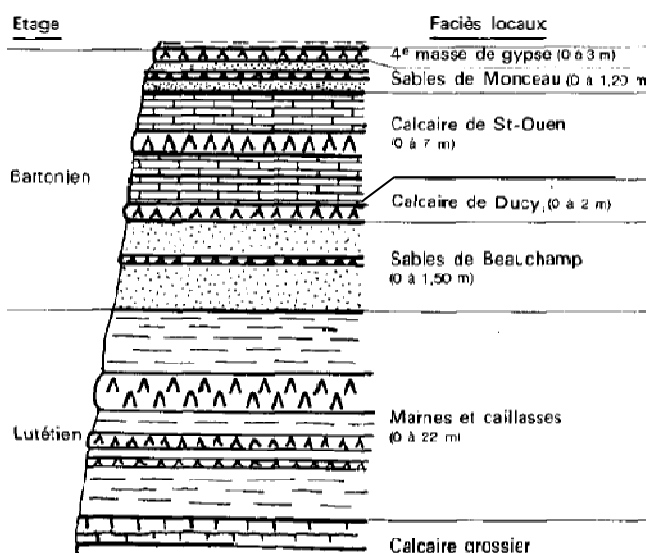


**Figure 1.94: Formation d'un fontis à partir des Marnes et Caillasses (Jardin, 1975).**

Dans des horizons gypseux, la modification du niveau piézométrique, l'inversion du sens d'écoulement ou même une augmentation de la température peuvent conduire à la dissolution du gypse (Toulemont, 1970, 1986). Il peut alors s'en suivre la formation d'une cavité qui peut conduire à un affaissement lent ou même à un effondrement brutal (Figure 1.94).

A Paris, le gypse est présent dans les formations ludiennes et antéludiennes. Il est constaté que le gypse ludien est en grande partie dénoyé. Ainsi, les fontis qui l'affectent ne résultent pas du comportement actuel des nappes, mais de l'existence d'anciennes carrières dont le ciel a évolué, ou de circulations gravitaires d'eau d'infiltration à la faveur de réseaux de fractures. La dissolution du gypse antéludien peut être ancienne (Soyer, 1961), mais il existe des dissolutions récentes qui peuvent s'observer à l'échelle humaine.

Les formations de gypse antéludien concernées par des phénomènes de dissolution en rapport avec les nappes sont de la plus ancienne à la plus récente (Figure 1.95) :



**Figure 1.95: Coupe stratigraphique du centre du Bassin Parisien présentant les niveaux gypseux antéludiens (Toulemont et al. 1972).**

- Les Marnes et Caillasses où le gypse est présent sous forme de bancs ou de grosses lentilles dont l'épaisseur cumulée peut atteindre 15 mètres et dont l'extension peut se développer sur une centaine de mètres. L'épaisseur de gypse dépend de l'épaisseur de la formation (voir chapitre 1).
- Les Sables de Beauchamp peuvent présenter quelques lentilles de gypse diffuses n'excédant pas une épaisseur cumulée de 1 m.
- Le Calcaires de Saint-Ouen où le gypse est également présent sous forme de lentilles. Son épaisseur cumulée peut excéder 6 m et dépend de l'épaisseur de la formation.



Le gypse se dissout jusqu'à saturation dans l'eau dans laquelle il se trouve ce qui produit des ions calcium et sulfate. La solubilité dépend de la température du milieu et la vitesse de dissolution est liée à la proportion d'eau non saturée qui circule dans les nappes (Mohsen et al. 2003). Sous l'effet d'une modification de ces facteurs, la dissolution peut s'intensifier ou diminuer.

Depuis plus d'un siècle, l'homme change les conditions hydrodynamiques des nappes lutétienne et bartonienne. Les différents acteurs sont :

- Les prélèvements d'eau qui favorisent les battements de nappe en diminuant les niveaux piézométriques, modifient le sens d'écoulement et augmentent localement les vitesses, influençant ainsi la dissolution du gypse. Ainsi, après un siècle de pompage pour l'alimentation des locomotives à vapeurs de la gare du Nord, en 1975, un fontis d'un diamètre de 23 m sur 40 m de haut a été découvert à 8 m sous les voies (Figure 1. 96). Cette dissolution de gypse antéludien a commencé au niveau des Marnes et Caillasses, puis a provoqué l'effondrement des Sables de Beauchamp puis du Calcaire de Saint-Ouen. Ce fontis a été comblé avec 7300 m<sup>3</sup> de béton et de coulis d'injection (Labatut et al. 1979). Un autre exemple flagrant du rôle des nappes sur la dissolution du gypse antéludien s'est déroulé dans les années 1990. Lors du creusement d'Eole, les vibrations du tunnelier ont provoqué la remonté d'un fontis sous des habitations (Figure 1. 97). Ce fontis est à mettre en relation avec des prélèvements d'eau (Vernoux et al. 2007).



**Figure 1. 96: Fontis dans le gypse antéludien sous la gare du Nord (photo: Solétanche-Bachy).**



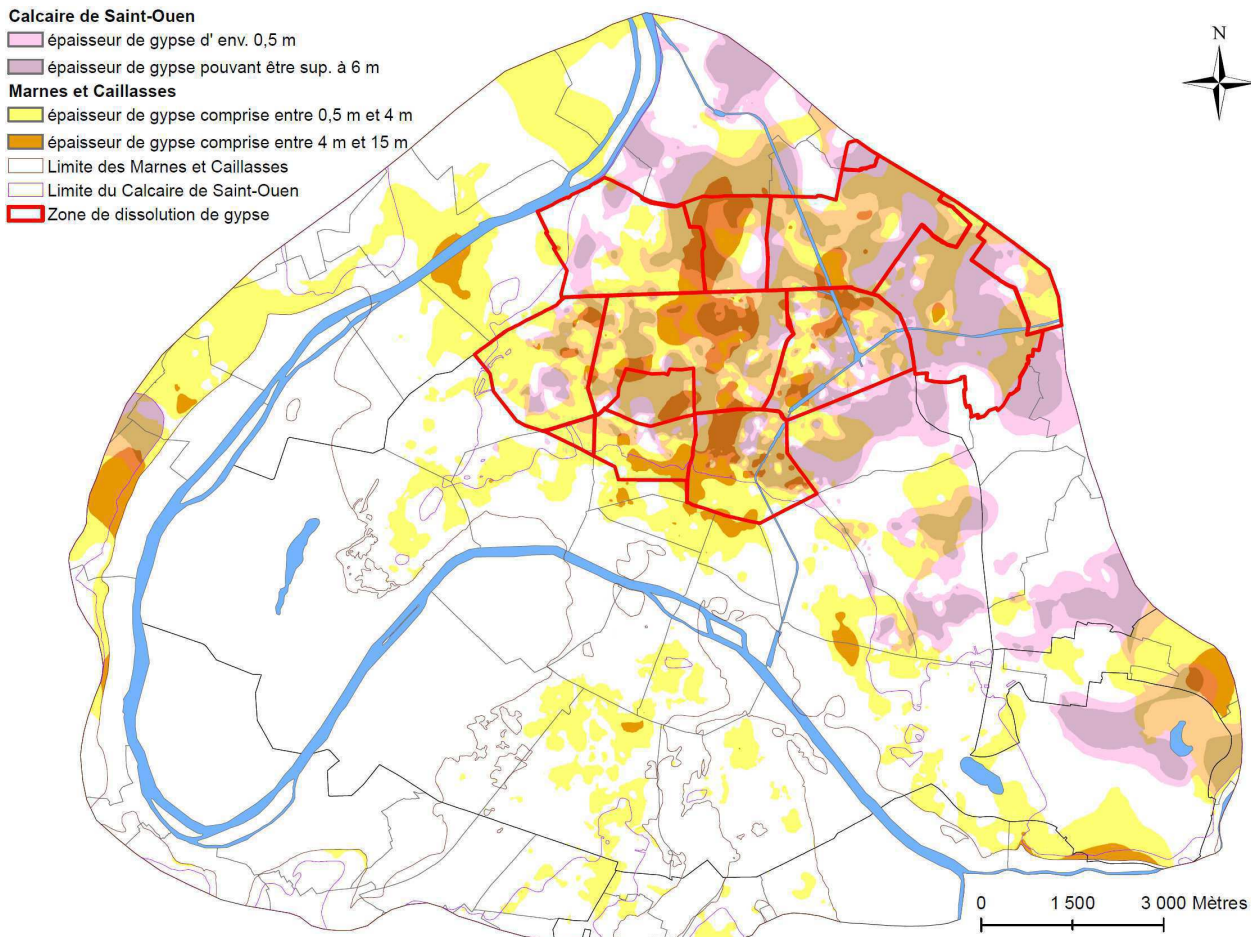
**Figure 1. 97: Destruction d'habitation causée par une poche de dissolution le gypse antéludien rue Papillon, 9e arrondissement (photo: IGC).**

- La réinjection, d'eau réchauffée issue d'installation de climatisation, directement dans la nappe augmente sa température, ce qui accroît la solubilité du gypse.
- Une modification du climat pourrait engendrer un changement du régime d'écoulement des eaux souterraines en modifiant par exemple les niveaux piézométriques ou les paramètres physico-

chimiques de l'eau. Il s'ensuivrait une réactivation du mécanisme de dissolution du gypse entraînant l'apparition de cavités souterraines (Watelet, 2010).

- L'infiltration accidentelle d'eau sous-saturée en sulfate (fuites de réseaux, canaux...)
- L'infiltration intensionnelle d'eau pluviale par épandage ou puisard en zone gypseuse. Ces eaux sous-saturées en sulfate atteignent la nappe, ce qui favorise la dissolution des horizons gypseux. A ce jour, bien que la construction de bâtiment en zone de dissolution du gypse soit réglementée par l'arrêté préfectoral du 25 février 1977 (avec une extension de la zone en 2000), ce n'est pas le cas de l'infiltration des eaux pluviales (Prunier-Leparmentier et al. 2007). Une réglementation est en cours d'élaboration.

Afin d'identifier les zones pouvant présenter des risques de dissolution, nous avons réalisé une carte exprimant l'épaisseur cumulée des bancs de gypse antéludien à partir de l'épaisseur des formations géologiques les contenant (Figure 1. 98) grâce à des règles empiriques reliant l'épaisseur de gypse cumulé à l'épaisseur de la formation la contenant. Les secteurs à risques se trouvent ainsi au Nord et au Nord-Est de Paris, au niveau de la fosse de Saint-Denis.



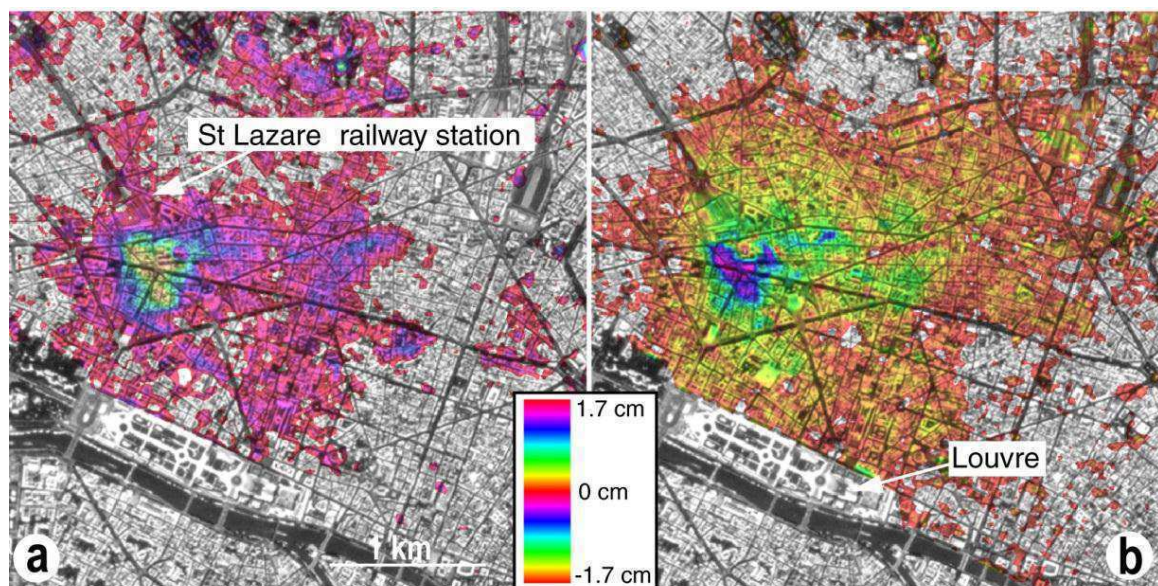
**Figure 1. 98: Carte de l'épaisseur des bancs gypseux dans les Marnes et Caillasses et dans le Calcaire de Saint-Ouen associée aux zones de dissolutions du gypse antéludien définies par l'arrêté du 27 février 1977 modifié en 1999.**



La modification souvent artificielle du régime hydrogéologique des nappes favorise l'accélération de la dissolution du gypse antéludien en détériorant la stabilité du sol. Ainsi, il a été estimé en 1972 (période où les nappes étaient fortement sollicitées), grâce au volume d'eau prélevé dans la nappe lutétienne, que chaque année plus de 17 000 m<sup>3</sup> de gypse sont dissous en Île-de-France (Toulemont et al. 1972).

#### 3.2.2. Tassements différentiels

Durant les travaux du projet Eole, où plus de 30 millions de m<sup>3</sup> d'eau ont été prélevés entre 1994 et 1996, des déplacements de la surface du sol ont été enregistrés dans le secteur de la gare Saint-Lazare. Une étude (Fruneau et al. 2003) a analysé ces mouvements verticaux grâce à la technique d'interférométrie radar différentielle satellitaire. Une quarantaine d'images radar acquises par des satellites avant, pendant et après le chantier (entre 1993 et 1999) ont permis de mettre en évidence une subsidence, une stabilisation puis une remontée du sol (Figure 1. 99). Ce comportement reflète l'évolution temporelle des pompages, donc du comportement des nappes.



**Figure 1. 99: (a) Carte de subsidence due au début des pompages, (b) Carte de la remontée totale due à la fin des pompages (Fruneau et al. 2004, 2005).**

Durant la période de subsidence correspondant au début des pompages, la zone impactée s'étend sur 1 200 m de long et 800 m de large avec un abaissement du sol atteignant 1,5 cm. Après l'arrêt des pompages, le sol est remonté de 1,6 cm sur une zone de déformation plus importante qui mesure 2 500 m de long sur 1 800 m de large. Ces mouvements verticaux ont entraîné l'apparition de fissures dans certains immeubles. Fruneau et al. (2005) attribuent les déplacements du sol, à des tassements de l'aquifère Yprésien consécutifs aux pompages. Cette étude a démontré l'importance des nappes sur la stabilité du niveau du sol, et l'on peut ainsi s'interroger sur l'état du bâti dans les secteurs à proximité de pompages importants.

### 3.2.3. Déstabilisation de fondations anciennes

Il existe à Paris un certain nombre de bâtiments anciens construits sur des pieux en bois putrescent comme par exemple la cathédrale Notre-Dame ou certains murs de quai. Les fondations bien souvent implantées dans la nappe alluviale garantissent la stabilité de l'ouvrage tant que les pieux baignent dans la nappe en permanence.

Entre 2001 et 2007, le Grand Palais construit pour l'exposition universelle de 1900, ferma ses portes afin de procéder à une reprise en sous-œuvre des éléments de sa structure. Les causes de ces travaux sont doubles:

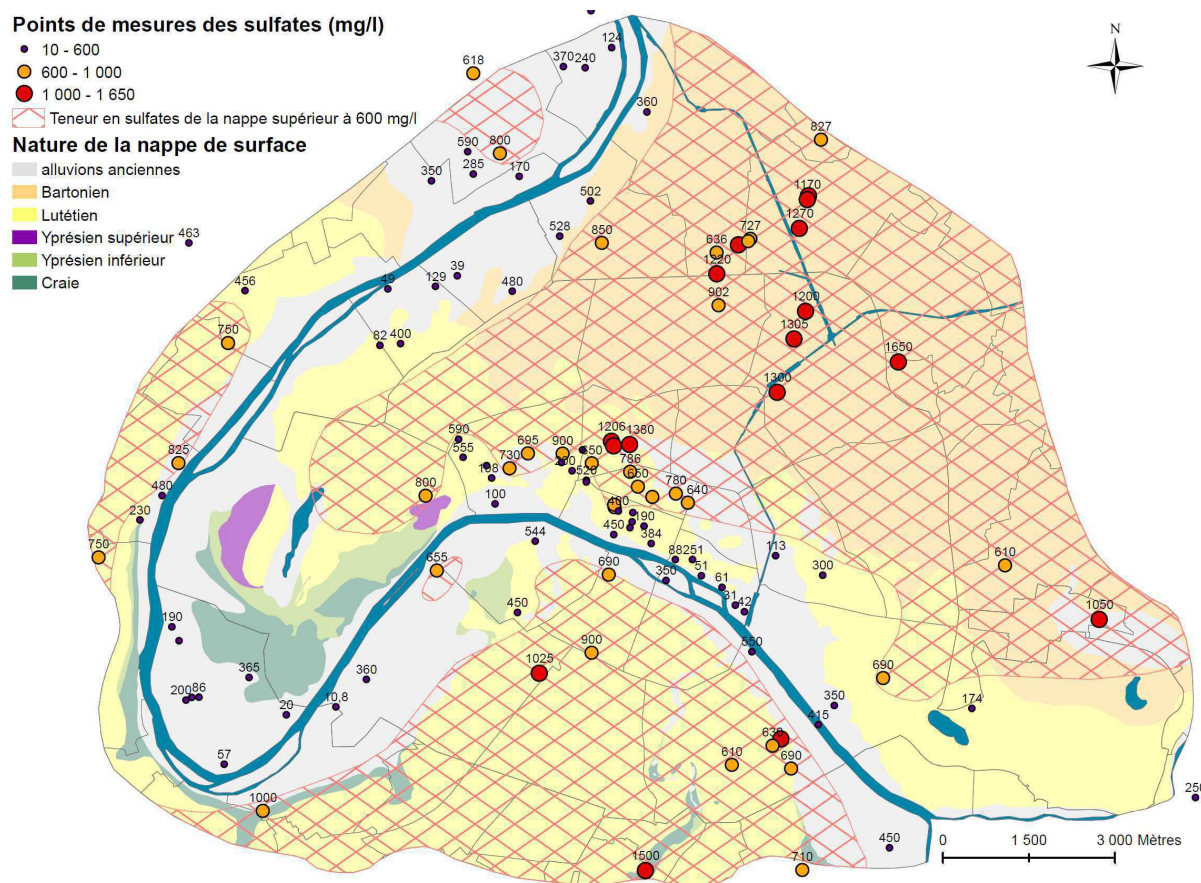
- Le secteur du Grand Palais n'est pas propice à l'implantation d'infrastructure (Fruneau, 2011) car il se trouve en partie sur un ancien bras de la Seine. La nature du sol est extrêmement hétérogène (alluvions anciennes, alluvions modernes, remblais) et présente de mauvaises caractéristiques géotechniques (coefficient de compaction important, mauvaise tenue des sols...).
- La nappe alluviale, présente sous le Grand Palais, a subi au cours du siècle dernier une diminution de son niveau piézométrique résultant de prélèvements d'eau. Elle présente également des variations liées aux crues de la Seine. Ces deux éléments ont participé à l'exposition à l'air libre de la tête des pieux en bois. Il s'en est suivi une putréfaction des éléments porteurs et une déstabilisation de l'ouvrage.

Il est probable que d'autres bâtiments construits sur des pieux en bois présentent ce même type de dégradation.

### 3.2.4. Attaques sulfatiques

La nappe phréatique parisienne possède des teneurs en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) comprises entre 10 et 1 650 mg/l et exceptionnellement jusqu'à 2 000 mg/l représentées sur Figure 1. 100. Cette carte comporte 120 données provenant de la RATP (39 données) et du BRGM via le site d'Infoterre (81 données). Elle est présentée à titre indicatif, car les données utilisées sont anciennes et furent récoltées entre 1960 et 2009. Des valeurs plus récentes n'ont pu être obtenues.

Cette carte reflète néanmoins l'influence de la Seine sur la nappe de surface. Nous pouvons y voir que les teneurs en sulfates sont plus faibles à proximité du fleuve ce qui est cohérent avec les valeurs sulfatiques de la Seine comprises entre 10 et 47 mg/l (AESN).



**Figure 1. 100: Teneurs en sulfates de la nappe de surface.**

La durée de vie d'un ouvrage (généralement garantie entre 30 ans et 100 ans) est caractérisée par sa capacité à conserver son niveau de fiabilité et son aspect dans son environnement avec des frais d'entretien aussi réduits que possible. Sa durabilité est donc intimement liée à des facteurs externes (physiques, chimiques ou mécaniques) pouvant détériorer les structures en béton. Ici nous nous intéresserons aux attaques sulfatiques externes des bétons.

Jusqu'à la fin des années 1970, les ciments utilisés (ciment portland composé - CPJ) étaient riches en aluminates de calcium qui réagissent aujourd'hui avec les eaux parisiennes chargées en sulfates et forment de l'ettringite secondaire appelée également sel de Candlot ou tri-sulfo-aluminate de calcium hydraté ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). Pour que les bétons réagissent, l'eau dans laquelle ils baignent doit avoir des teneurs en sulfates supérieures ou égales à 600 mg/l (Rozière, 2007).

Le mode d'action des attaques sulfatiques (aujourd'hui encore mal connu) dépend essentiellement des concentrations en sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$ , de la température du milieu et du pH. Dans les ciments riches en CaO, l'ettringite se forme *in situ* au contact des aluminates de calcium et d'une solution sursaturée en sulfate en formant de petits agrégats plus ou moins colloïdaux. Ces derniers ont un volume molaire 3 à 8 fois plus important que les composants du ciment. Lorsque l'ettringite est produite en quantité suffisante, ces sels à caractère expansif, conduisent à un gonflement du béton, à sa fissuration, à une perte de résistance et à une altération de sa surface pouvant aboutir à une ruine

des matériaux. Les fissures produites sont généralement très fines, donc passent inaperçues et s'organisent en un maillage (ou faïençage) favorisant l'extension de cette corrosion. Les bétons actuels sont majoritairement constitués de ciments de haut fourneau favorisant la cristallisation en aiguilles d'ettringite dans les vides interstitiels (Leroux et al. 2000). Ce type d'ettringite n'est pas expansif, donc impacte peu les bétons.

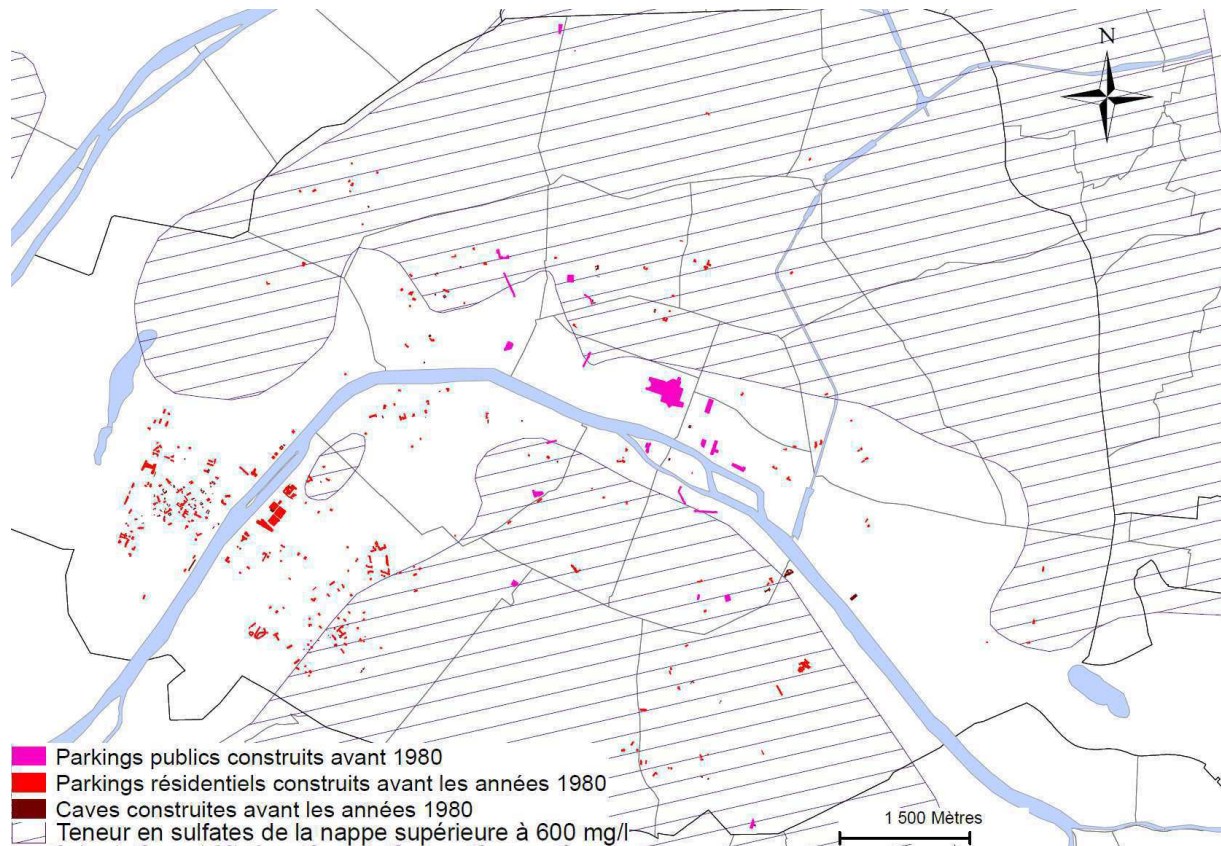
Lorsqu'une infrastructure est touchée par ces dégradations, et qu'aucun traitement n'est entrepris, le béton peut complètement perdre ses propriétés mécaniques et dégager du sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ) pouvant être mortel s'il est inhalé. Selon une enquête de l'OCDE réalisée en 1989 (OCDE), les attaques sulfatiques constituent la deuxième cause de dégradation des bétons, après la corrosion des armatures. Ce phénomène n'est pas isolé, et quelques parkings parisiens (6<sup>e</sup> et 8<sup>e</sup> arrondissement) construits avant les années 1980 présentent ces symptômes. Pour limiter la formation d'ettringite, il est nécessaire de modifier la composition du béton en diminuant le taux d'aluminates, en les remplaçant par des laitiers de haut fourneau (par exemple le ciment de laitier au clinker - CLK).

Depuis les années 1970, la France a subi un fort développement de ses activités tertiaires, ce qui a entraîné une augmentation importante du volume annuel de construction de bureaux. Afin d'endiguer l'invasion de voitures « domicile-travail » stationnées sur la voie publique, l'ancien article U.12 du Plan d'Occupation des Sols (article A123-2 du code de l'urbanisme) imposait l'aménagement de places de stationnements hors des voies publiques lors de la délivrance du permis de construire. Ces règles ont été préconisées dans une note technique du 26 mars 1973 de la DAFU (Direction à l'Aménagement Foncier de l'Urbanisme) indiquant la nécessité d'imposer des normes de stationnement aux immeubles de bureaux mais aussi aux logements et aux autres activités industrielles et commerciales. Il est également stipulé (ancien article L. 421-3 du code de l'urbanisme) que lorsque le constructeur ne peut réaliser d'aires de stationnement, il lui est possible de s'affranchir de ses obligations en versant une participation financière à la commune, en réalisant un parc de stationnement dans un rayon de 300 mètres ou en acquérant des places dans un parc privé ou public. Depuis l'adoption du PLU actuel (12 juin 2006), la législation (article L123-1-2) s'est assouplie. Ainsi il n'y a plus d'obligation de construction de parkings pour les bureaux et les commerces, lorsque le nombre d'emplacements pour les habitations est d'une place pour 100 m<sup>2</sup> si la SHON (Surface Hors Œuvre Nette) est supérieur à 1 000 m<sup>2</sup>. La politique urbaine parisienne des années 1970 favorisait l'implantation de parkings souterrains, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui. Ce contexte législatif de stationnement à Paris nous permet de comprendre pourquoi plus de 40% des parkings souterrains concédés par la Ville de Paris furent construits avant les années 1980, c'est-à-dire avec des bétons sensibles aux attaques sulfatiques.

En associant les parkings publics et privés implantés dans les nappes avec leur date de construction, nous avons pu identifier 331 parkings résidentiels et 25 parkings publics construits avant les années 1980 (Figure 1. 101). Sur ces 356 structures, 13 parkings publics et 102 parkings



résidentiels se trouvent dans la nappe dans des secteurs où la teneur en sulfates est supérieure à 600 mg/l, et sont donc susceptibles de subir des attaques sulfatiques.



#### 3.2.5. Ennoyage de sous-sol par remontée de nappe

Dans les années 1970, les débits d'eau prélevés ont fortement diminué, ce qui a entraîné une remontée des nappes. Cela engendra différents types d'incidents (Bergeron et al. 1983):

- Des venues d'eau dans les structures souterraines dont le cuvelage étanche est à présent submergé (Figure 1. 102) ou endommagé.
- Un soulèvement du bâtiment. Si la structure souterraine est profonde avec un cuvelage suffisamment important pour éviter une inondation, et son ancrage médiocre, le bâtiment a tendance à « flotter » sous l'effet de la poussée d'Archimède.
- Une liquéfaction des fondations. Sous l'effet d'une poussée d'écoulement, le sol peut perdre sa capacité portante, ce qui peut amener une rupture des fondations, donc à la ruine du bâtiment.
- Des pollutions chimiques (Figure 1. 103).





**Figure 1. 102: Venues d'eau sous la place de la Madeleine résultant d'une remontée des nappes en 1975 (Bergeron et al. 1983).**

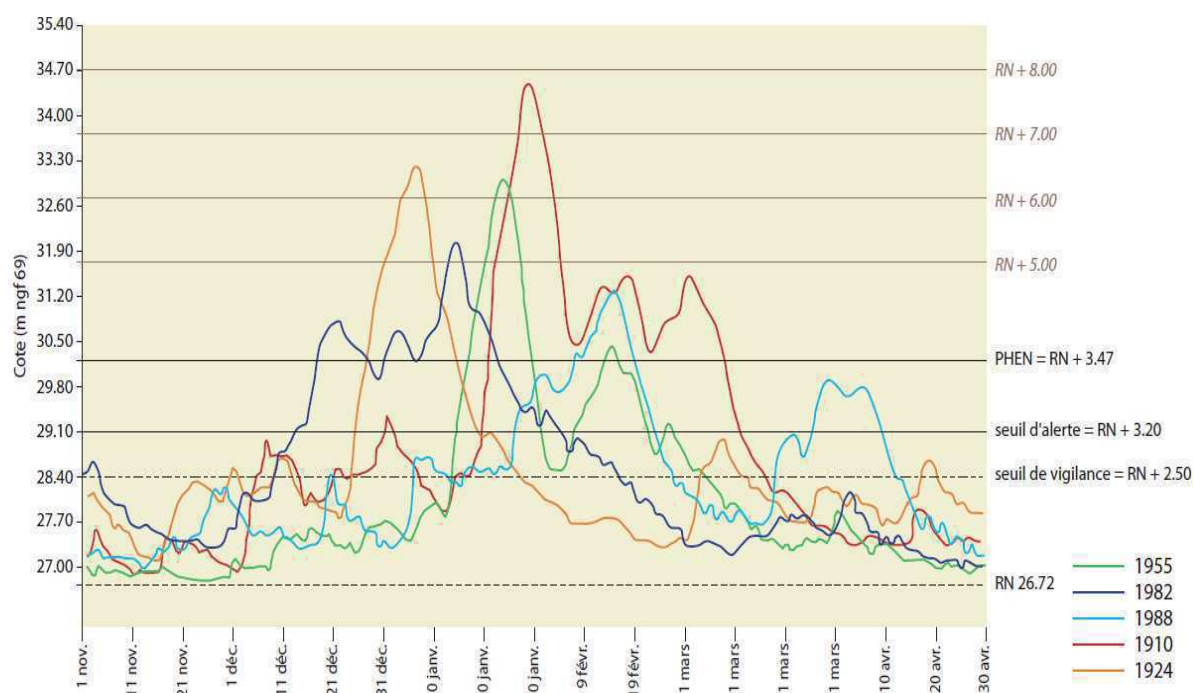


**Figure 1. 103: Venues d'eau polluée au niveau de la jonction entre un tunnel et une station de métro. (photographie A. Lamé)**

Depuis 1975, le taux d'occupation du sous-sol parisien a fortement augmenté rendant plus vulnérable le sous-sol parisien en cas de remontée des nappes.

### 3.2.6. Crues

La Seine a toujours connu des crues qui se produisent principalement en hiver jusqu'au début du printemps avec une fréquence plus importante en janvier et une légère reprise fin mars début avril (Figure 1. 104). Elles se caractérisent par leur durée et le débit du fleuve qui dépend de l'amplitude de l'épisode pluvieux et de la gestion des barrages réservoirs. Une crue centennale a une chance sur cent de se produire chaque année et deux chances sur trois de se produire en un siècle



**Figure 1. 104: Crue de référence (1910) et crues récentes à la station Paris-Austerlitz (Document Port Autonome de Paris).**

Bien que la crue du 27 février 1658 (Tableau 1. 21), soit la plus importante connue, la crue de 1910, où la Seine a atteint la cote de 34,52 m reste la référence centennale pour l'Île-de-France. Les conditions hydro-météorologiques étaient particulières, car les nappes étaient particulièrement hautes suite à deux années consécutives de recharge excédentaires. Les sols étaient gelés au moment de fortes pluies, ce qui a favorisé un ruissellement intense et provoqué plusieurs ondes de crues sur l'Yonne, le Loing, le Grand Morin, la Marne, la Seine amont avec une arrivée simultanée à Paris (Annexe 1. 47) provoquant une pointe de crue avec un débit maximum atteignant 2 400 m<sup>3</sup>/s.

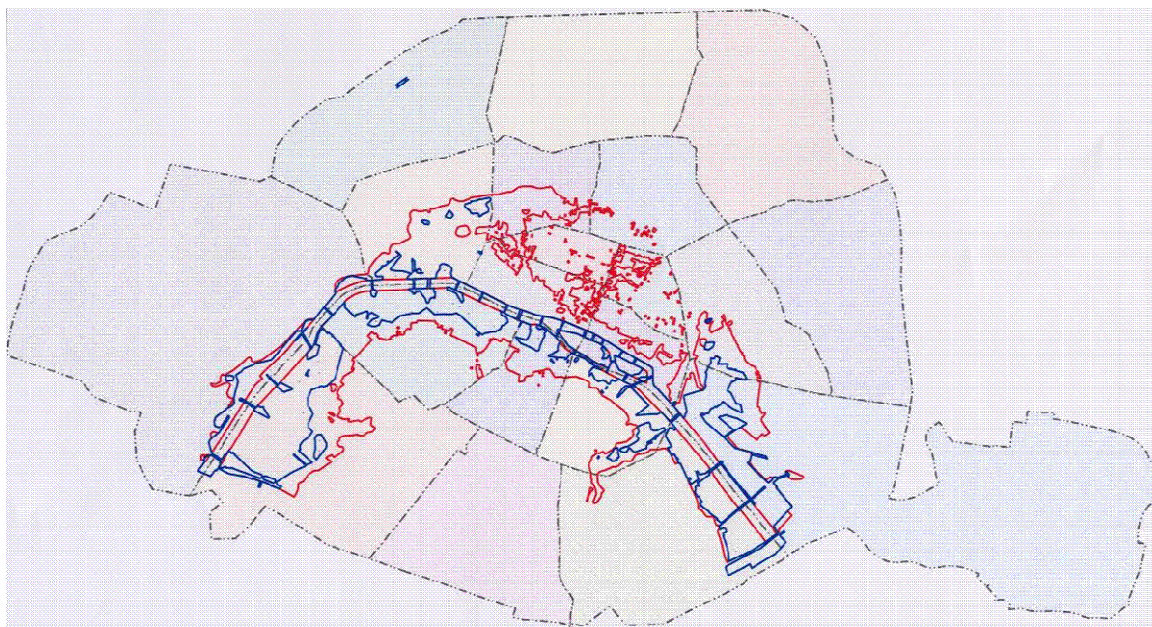
Crues centennales		Autres crues		
27 février 1658	8,96 m	6 janvier 1924	7,32 m	
28 janvier 1910	8,62 m	23 janvier 1955	7,12 m	Crue cinquantennale
26 décembre 1740	8,05 m	14 janvier 1982	6,15 m	La plus forte des 25 dernières années (Crue décennale)
9 février 1799	7,65 m			
28 janvier 1802	7,62 m	Mars 2001	5,15 m	Dernière crue dépassant les 5 m

**Tableau 1. 21: Hauteur de crues à l'échelle de Paris Austerlitz (source : DIREN).**

Une étude menée en 2008 par l'EPTB Seine Grands Lacs (anciennement IIBRBS Institution Interdépartementale des Barrages Réservoirs du Bassin de la Seine) estime que le coût d'une crue centennale se produisant aujourd'hui s'élèverait au minimum à 17 milliards d'euros et entraînerait un bouleversement du fonctionnement de l'agglomération parisienne. Les différentes conséquences seraient :

- Réduction de la production d'eau potable de 30%
- Arrêt à 70 % du trafic du métro pendant 30 à 50 jours, et pour la RATP, le rétablissement total de leur réseau prendrait plusieurs années.
- Arrêt à 50 % du trafic RER pendant 30 à 50 jours
- Plus de 1 800 000 habitants d'Ile-de-France (dont 700 000 à Paris) seraient privés d'électricité ainsi que 2 700 entreprises (dont 800 à Paris), et donc de chauffage.
- Coupure du téléphone pour un million d'abonnés
- Près de 100 000 abonnés seraient privés de gaz,
- 5 usines de traitement des ordures ménagères seraient stoppées,
- 5 centres de production de chauffage urbain seraient inutilisables
- 40% des capacités d'hospitalisations seraient menacées (15 hôpitaux sur 40...)
- Remontée à la surface de plus de 2 millions de rats d'égouts.

Comme nous avons pu l'écrire précédemment, le niveau des nappes est en étroite relation avec le niveau de la Seine. La crue de 1910 en débordant a réalimenté les nappes, ce qui a entraîné une augmentation de leurs cotes piézométriques. Il s'en est suivi en ennoiment de caves au delà des zones inondées (Figure 1. 105). Le contexte urbain parisien a énormément évolué au cours du siècle dernier, et on peut aussi s'attendre à une modification des effets d'une crue centennale par rapport à la situation de 1910.



**Figure 1. 105: Carte de la crue de 1910. En bleu les zones inondées et en rouge les zones de caves inondées (document historique de la Commission des Inondations).**

## **Partie 2**

# **Conceptualisation de l'hydrogéologie parisienne**





Afin de conceptualiser l'hydrosystème parisien, nous avons dans un premier temps créé un système d'information géographique, avec le logiciel ArcGIS distribué par ESRI, qui intègre les différents éléments interférant avec l'écoulement des nappes. Nous illustrerons ce Système d'Information Géographique (SIG) par des vues tridimensionnelles réalisées grâce à l'application ArcScene. Ceci ne constitue qu'une illustration car tout l'intérêt des SIG n'apparaît réellement que lorsqu'ils sont manipulés en ligne.

### 1. Création d'un SIG

#### 1.1. Bases de données existantes et éléments utilisés

##### 1.1.1. La géologie

Afin de reconstituer la géologie parisienne, nous avons utilisé plusieurs types de données.

La première base de données correspond aux cartes géologiques de l'IGC qui sont à l'échelle 1 / 5 000. Il s'agit des 14 cartes de la ville de Paris (publiées en 1986) et des 49 cartes des autres communes concernées par la modélisation hydrogéologique. Ces dernières, ne sont pas toujours bien lisibles car elles furent réalisées avant 1960 et le temps les a bien souvent dégradées. Depuis, certaines ont été refaites. Les sondages qui y figurent n'étaient pas référencés dans une base de données documentaire compatible avec les Systèmes d'Information Géographique. Nous avons donc dû saisir manuellement les coordonnées et les données géologiques de 6 674 sondages à Paris et 3 635 sondages dans la banlieue. La seconde base de données correspond à deux fichiers du BRGM nommés « XY sondages » et « geoparis ». 3 892 sondages géologiques issus du fichier geoparis et 3 571 du fichier « XY sondages » furent utilisés. 1 164 sondages, bien que possédant des noms différents, étaient identiques.

Au final, le nombre effectif de sondages géologique retenus dans ces différentes bases de données s'élève à 17 772 (Figure 2. 1).

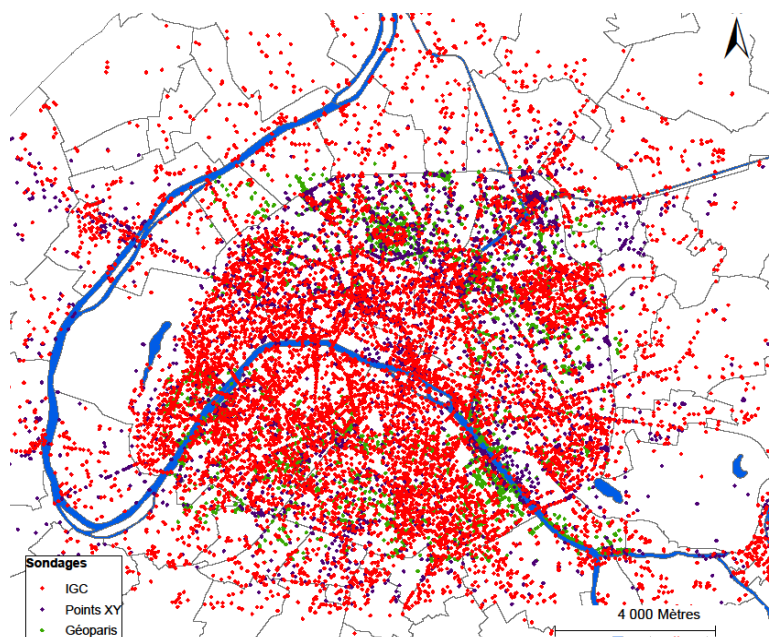


Figure 2. 1: Carte des 17 772 sondages géologiques utilisés.

Le Tableau 2. 1 récapitule les différents sondages traités, classés par formations géologiques atteintes et par origine des données. Certains sondages géologiques issus des fichiers du BRGM contenaient quelques erreurs de géoréférencement ou d'identification des formations géologiques traversées, comme c'est le cas par exemple des sondages atteignant le toit de l'Argile Plastique souvent confondue avec les Fausses Glaises. Toutes les valeurs nous semblant erronées furent supprimées manuellement.

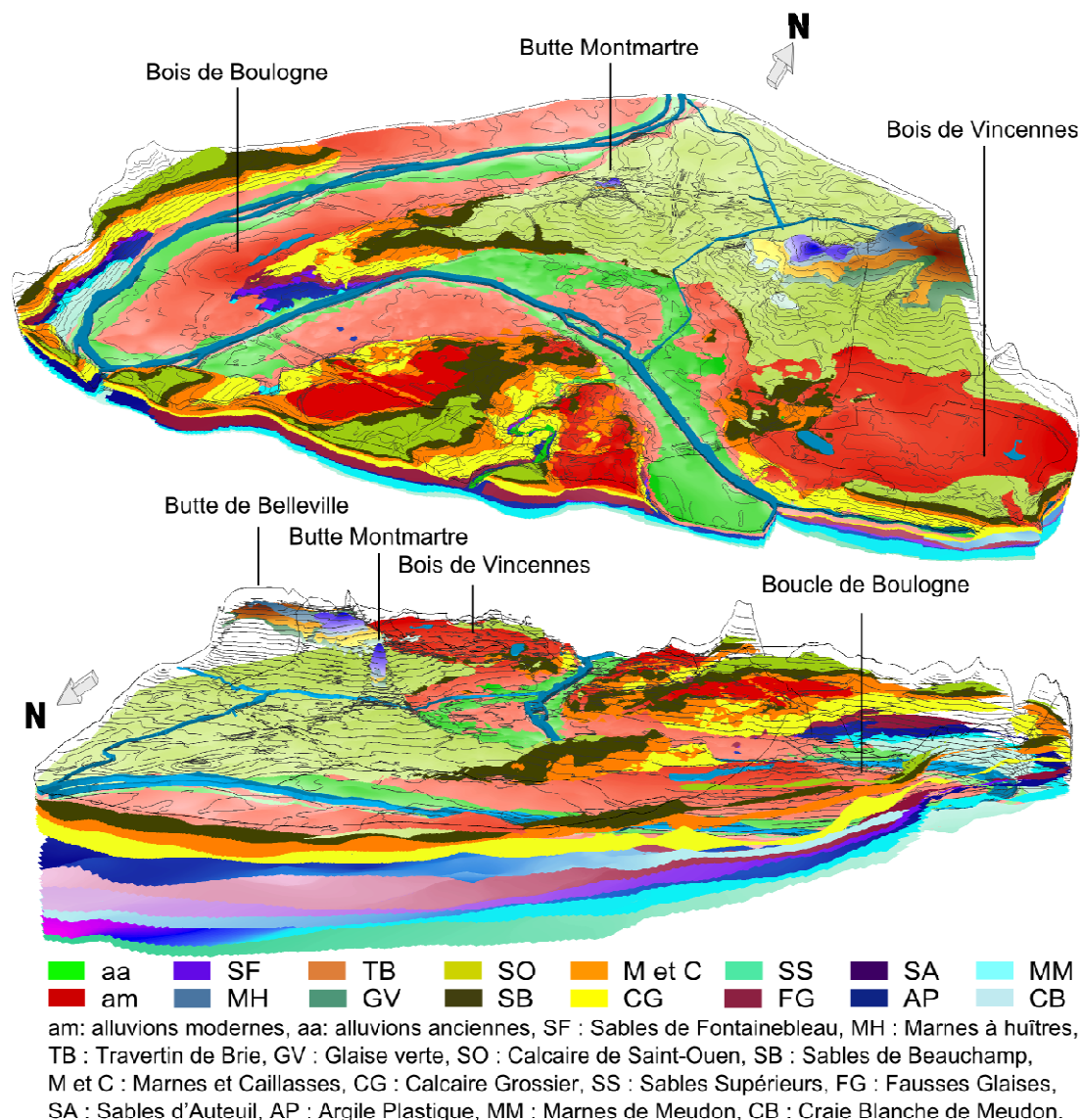
Formations géologiques	sondages IGC	sondages IGC Banlieue	Sondages Géoparis	sondages géoparis supprimés	Sondages XY sondages	sondages XY sondages supprimés	sondages totaux	Total des sondages utilisés	Total des sondages supprimés	% sondages supprimés
<b>am</b>	1 106	272	638	80	496	59	2 512	2 373	139	<b>5,53</b> %
<b>aa</b>	2 849	642	1 027	142	1 249	283	5 767	5 342	425	<b>7,37</b> %
<b>SF</b>	121	6	16	0	34		177	177	0	<b>0,00</b> %
<b>MH</b>	83	14	51	0	15		163	163	0	<b>0,00</b> %
<b>TB</b>	234	36	96	0	69		435	435	0	<b>0,00</b> %
<b>GV</b>	302	38	56	0	108		504	504	0	<b>0,00</b> %
<b>MC</b>	47	13	15	1	27		102	101	1	<b>0,00</b> %
<b>SV</b>	610	44	497	58	479	49	1 630	1 523	107	<b>6,56</b> %
<b>SO</b>	1 063	527	779	112	1 020	135	3 389	3 142	247	<b>7,29</b> %
<b>SB</b>	1 571	702	1 131	175	1 294	157	4 698	4 366	332	<b>7,07</b> %
<b>M et C</b>	2 315	703	1 521	131	1 674	126	6 213	5 956	257	<b>4,14</b> %
<b>CG</b>	2 292	463	1 731	237	1 823	220	6 309	5 852	457	<b>7,24</b> %
<b>AL</b>	16		40	13	66	24	122	85	37	<b>30,33</b> %
<b>SS</b>	318	160	168	30	359	42	1 005	933	72	<b>7,16</b> %
<b>FG</b>	650	175	495	37	676	59	1 996	1 900	96	<b>4,81</b> %
<b>SA</b>	254	49	175	15	305	28	783	740	43	<b>5,49</b> %
<b>AP</b>	440	114	705	173	594	97	1 853	1 583	270	<b>14,57</b> %
<b>MM</b>	367	91	332	38	428	52	1 218	1 128	90	<b>7,39</b> %
<b>CB</b>	291	130	378	33	549	62	1 348	1 253	95	<b>7,05</b> %
<b>Nombre de données</b>	<b>14 929</b>	<b>4 179</b>	<b>9 851</b>	<b>1 275</b>	<b>11 265</b>	<b>1 393</b>	<b>40 224</b>	<b>37 556</b>	<b>2 668</b>	<b>6,63</b> %

**Tableau 2. 1: Récapitulatif des sondages utilisés.**

*am: alluvions modernes, aa: alluvions anciennes, SF: Sables de Fontainebleau, MH: Marnes à huîtres, TB: Travertin de Brie, GV: Glaise verte, MC: Marnes à Cyrènes, SV: Sables Verts, SO: Calcaire de Saint-Ouen, SB: Sables de Beauchamp, M et C: Marnes et Caillasses, CG: Calcaire Grossier, AL: Argile de Laon, SS: Sables Supérieurs, FG: Fausses Glaises, SA: Sables d'Auteuil, AP: Argile Plastique, MM: Marnes de Meudon, CB: Craie Blanche de Meudon.*

Au final 37 556 données renseignant sur la cote du toit des formations issues des 17 772 sondages furent utilisées afin de réaliser un modèle géologique actualisé de Paris en trois dimensions. Pour cela, nous avons dans un premier temps réalisé grâce aux sondages, une carte géologique de Paris et de sa proche banlieue. Une fois cette étape effectuée, nous avons construit un modèle altimétrique du mur et du toit de chaque formation géologique, en dessinant manuellement des courbes isovaleurs cohérentes avec les sondages géologiques. Pour finir, nous avons interpolé

par krigeage nos isolignes et nos points de sondages. Cette dernière étape nous a permis d'obtenir des images digitalisées des cotes du toit, du mur et de l'épaisseur de chaque formation (Figure 2. 2). Afin de vérifier notre modèle, nous l'avons comparé aux coupes géologiques du métro fournies par la RATP et l'IGC. Les différences n'excèdent pas 20 à 30 cm. Nous estimons que notre modèle géologique exploite ainsi correctement les données et est représentatif de la géologie parisienne.



**Figure 2. 2: Carte du toit des formations géologiques de Paris en 3 dimensions associée à la topographie selon 2 angles de vues différents (échelle verticale multipliée par 15).**

Au final, chaque formation géologique possède un dossier comportant plusieurs types de données qui sont :

- Un fichier de zonage comportant des polygones correspondant aux limites de la formation géologique.
- Un fichier raster (taille des cellules 5 x 5 m) associé à un fichier d'isolignes (au pas de 1 m) du toit de la formation



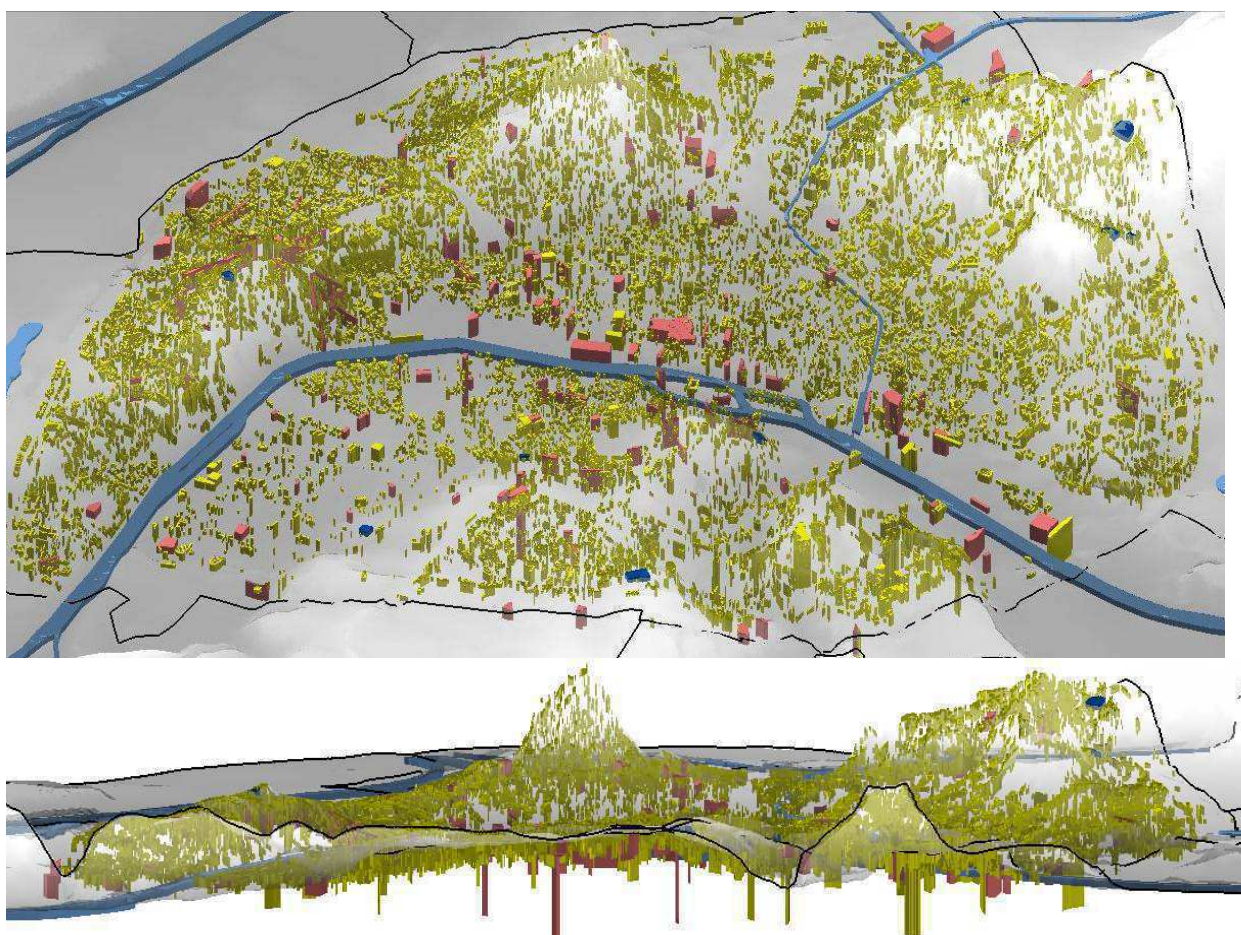
- Un fichier raster (taille des cellules 5 x 5 m) associé à un fichier d'isolignes (au pas de 1 m) du mur de la formation
- Un fichier raster (taille des cellules 5 x 5 m) associé à un fichier d'isolignes de l'épaisseur (au pas de 1 m) de la formation
- Un fichier Excel des sondages de chaque formation géologique contenant plusieurs types de données détaillées dans le Tableau 2. 2.

Nom du sondage	Coordonnées X (Lambert 1)	Coordonnées Y (Lambert 1)	Cote du sol	Cote du toit	Cote du mur	Epaisseur de la formation	Description lithologique du sondage	Date du sondage	Origine de la donnée (XY sondage, geoparis ou IGC)
----------------	------------------------------	------------------------------	-------------	--------------	-------------	---------------------------	-------------------------------------	-----------------	---

**Tableau 2. 2: Description des données associées aux sondages. Les cotes sont en IGN 69.**

#### 1.1.2. Le bâti sous-terrain

Il a été déclaré à la Direction Générale des Finances Publiques en 2008, 7 599 parkings privés et 12 422 caves auxquelles il faut ajouter 147 parkings publics concédés par la ville de Paris. Ces structures ont été identifiées comme expliqué précédemment et représentées en 3 dimensions (Figure 2. 3).



**Figure 2. 3: Vues tridimensionnelle du bâti parisien avec en jaune les parkings privés et les caves, en rouge les parkings publics et en bleu foncé les bassins réservoirs souterrains.**

Les données relatives aux caves et aux parkings privés sont contenues dans un fichier de polygones auxquels est associée une table attributaire. Nous n'avons aucune précision sur les cuvelages éventuels. Chaque polygone possède ainsi un certain nombre d'attributs récapitulés dans le Tableau 2. 3.

Objet (parking privé ou cave)	Arrondissement	N° de la rue	Nom de la rue	Coordonnées X du centre du polygone	Coordonnées Y du centre du polygone	Année ou période de construction	Superficie de la structure (m <sup>2</sup> )	→
→	Nombre de places	Nombre de niveaux	Profondeur du parking	Cote du sol	Cote du radier	Volume de la structure (m <sup>3</sup> )	Interfère avec la nappe	Hauteur de la structure dans la nappe (m)

**Tableau 2. 3: Attribut figurant dans le fichier des parkings privés et caves.**

Le fichier couche des parkings concédés par la Ville de Paris renferme des polygones auxquels est attachée une table attributaire contenant les informations présentées dans le Tableau 2. 4.

	Nom du parking	Arrondissement	N° de la rue	Nom de la rue	Année de construction	Superficie de la structure (m²)	→
→	Type de parking (privé, public, mixte)	Formations géologiques rencontrées	Cote du sol	Nombre de places	Nombre de niveaux	Profondeur du parking	→
→	Cote du radier	Volume du parking (m³)	Interfère avec la nappe (oui / non)	Hauteur de la structure dans la nappe (m)	Prélève de l'eau (oui / non)	Volume d'eau prélevé déclaré en 2009 (M m³/an)	

**Tableau 2. 4: Données relatives aux parkings concédés par la Ville de Paris.**

### 1.1.3. Les transports ferroviaires souterrains

Le réseau ferroviaire se localise en grande partie dans le sous-sol parisien. Grace aux coupes géologiques et aux coupes d'implantation réalisées durant la construction du métro et du RER, nous avons pu tracer en trois dimensions le réseau souterrain.

Nous avons utilisé le fichier géoréférencé du tracé du métro et du RER fourni par la RATP. Cette entité est composée de segments que nous avons découpés pour distinguer les portions interférant ou non avec les nappes phréatiques. Un fichier de points indiquant la cote du radier des galeries lui est associé. Les réseaux de transport ferroviaire ont été différenciés, car le diamètre des tunnels est de 5 m pour le métro et 9 m pour le RER.

Le fichier de segments comporte plusieurs attributs récapitulés dans le Tableau 2. 5

Objet (métro ou RER)	Nom de la ligne	Interfère avec la nappe (oui / non)	Pénétration de la structure dans la nappe (0 à 3 m ou plus de 3 m)
----------------------	-----------------	-------------------------------------	--

**Tableau 2. 5: Eléments relatifs au tracé du réseau ferroviaire souterrain.**

Le fichier de points, composé de 2 310 objets géoréférencé manuellement, renseigne les éléments présentés dans le Tableau 2. 6.

Objet (métro ou RER)	Nom de la ligne	Coordonnées X	Coordonnées Y	Cote du radier
----------------------	-----------------	---------------	---------------	----------------

**Tableau 2. 6: Eléments des fichiers de points indiquant la cote du radier du réseau ferroviaire souterrain.**

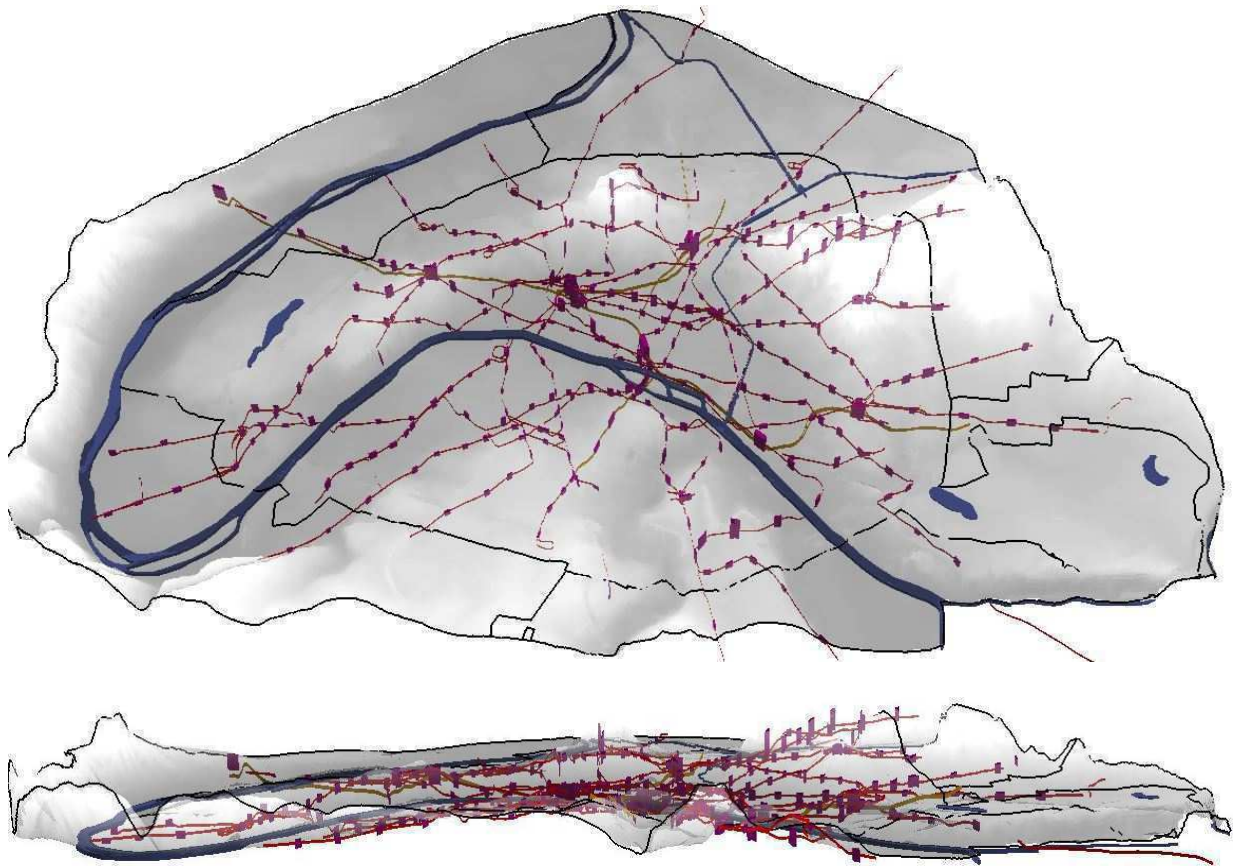


Les stations de métro et de RER ont été intégrées au SIG sous la forme d'une entité de base renfermant 378 polygones qui possèdent une table attributaire rassemblant les informations présentées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Nom de la station	Ligne de métro ou de RER	Cote du sol (NGF)	Superficie de la station (m <sup>2</sup> )	→
→	Profondeur du radier (NGF)	Cote du radier (NGF)	Interfère avec la nappe (oui / non)	Pénétration de la structure dans la nappe (m)

**Tableau 2. 7: Eléments présents dans la table attributaire des polygones stations.**

Tous les éléments du transport ferroviaire souterrain sont visibles en 3 dimensions sur la Figure 2. 4.



**Figure 2. 4: Vue tridimensionnelle du réseau ferroviaire souterrain (en violet les stations, en rouge le métro et en orange le RER) – échelle verticale multipliée par 15.**

#### 1.1.4. Synthèse des infrastructures souterraines

En fonction des informations rassemblées, nous estimons que les parkings, caves, stations, métro et RER cartographiés occupent 11,5% de la surface de Paris (Figure 2. 5). Elles se situent généralement à des profondeurs inférieures à 15 m, avec occasionnellement des structures implantées plus profondément comme le parking Harlay qui possède des fondations profondes de 52 m.

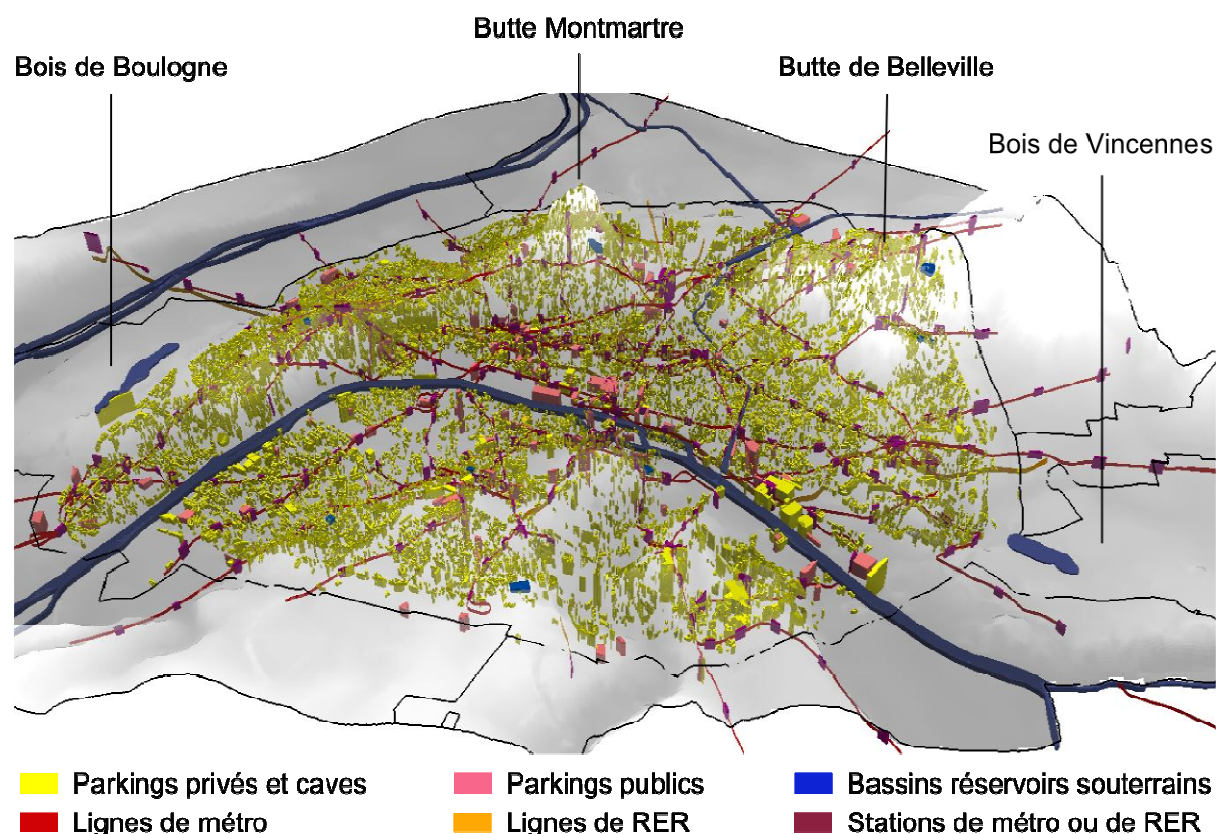


Figure 2. 5: Occupation tridimensionnelle du sous-sol parisien par les parkings, métro et RER associée à la topographie (échelle verticale multipliée par 15).

La densité d'occupation du sous-sol, n'est pas homogène à Paris. Ainsi, certaines zones, comme au niveau des carrières dans le 14<sup>e</sup> arrondissement, possèdent des infrastructures souterraines moins nombreuses qu'au niveau de la place de l'Etoile par exemple (Figure 2. 6).

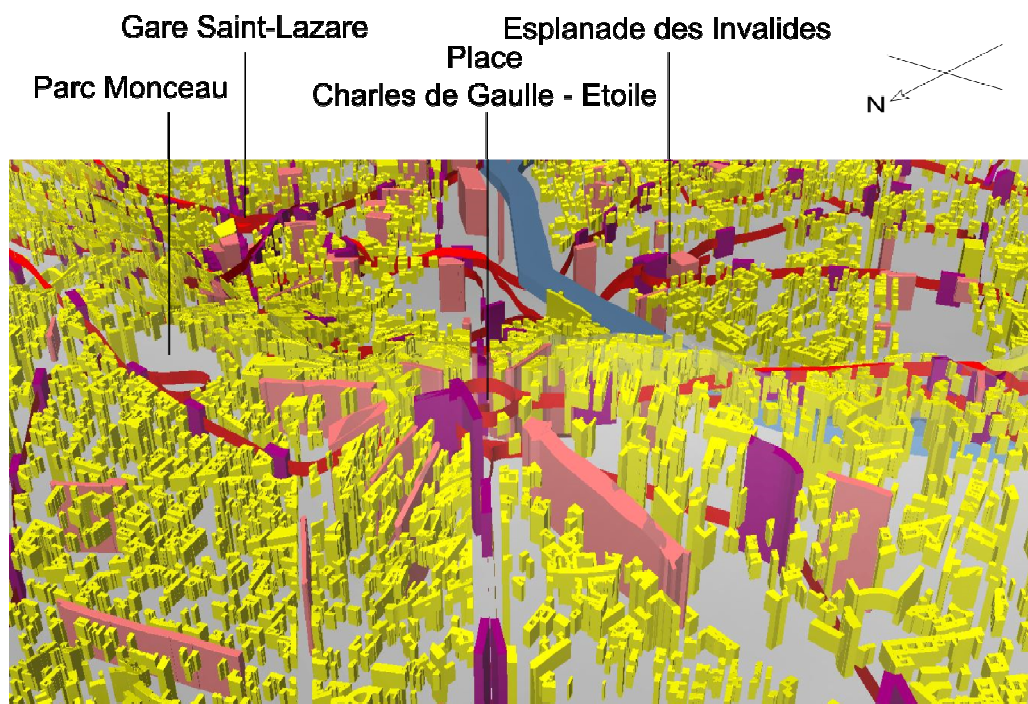
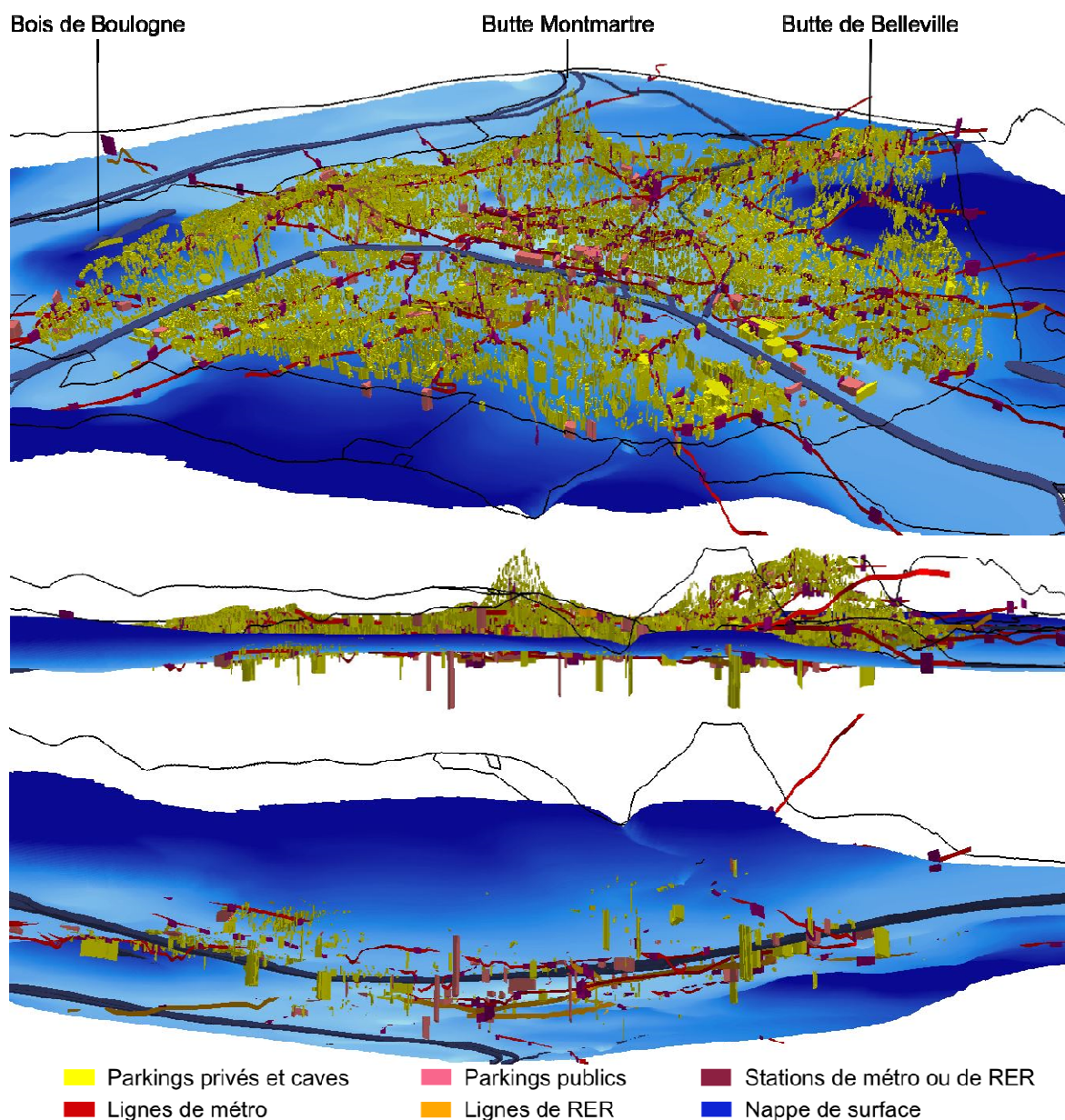


Figure 2. 6: Occupation du sous-sol au niveau de la Place de l'Etoile.



## 1.2. Visualisation des interférences bâti souterrain – nappes

Notre SIG, nous a permis de construire un modèle tridimensionnel du sous-sol parisien, afin d'appréhender au mieux les relations entre la géologie, les structures souterraines et les nappes. La Figure 2. 7 montre une représentation en 3 dimensions, selon trois angles de vue différents, des bâtis et des réseaux pénétrant la nappe phréatique dans sa situation piézométrique de 2010. Nous pouvons y voir, notamment sur la vue de dessous (figure du bas), que ces structures souterraines sont localisées majoritairement à proximité de la Seine, ce qui n'est pas étonnant car c'est ici que la nappe se trouve être la moins profonde.



**Figure 2. 7: Représentation tridimensionnelle des structures souterraines parisiennes et du toit de la nappe phréatique (en bleu) selon 3 angles de vue différents – vue de dessus, vue à l'horizontale et vue par en dessous (échelle verticale multipliée par 15).**

## 2. Construction du modèle hydrogéologique

L'étape suivante consiste à construire un modèle hydrogéologique à partir des informations rassemblées dans le SIG.

### 2.1. Structure du système aquifère multicouche

Comme nous avons pu le décrire précédemment, l'hydrogéologie parisienne, de par son contexte géologique et urbain, est des plus complexes. Afin de modéliser ce système aquifère multicouche nous avons conceptualisé les formations géologiques en fonction de leurs propriétés hydrogéologiques en distinguant leur caractère perméable ou semi-perméable suivant l'analyse faite dans la partie 1. Nous avons abouti à un système comportant 11 couches décrites du haut vers le bas dans le Tableau 2. 8.

Formations géologiques contenues dans la couche	Nom de la couche	Nature hydrogéologique
Alluvions modernes	am	Semi-perméable
Alluvions anciennes	aa	Aquifère
Calcaire de Saint-Ouen Sables de Beauchamp supérieurs	Bartonien	Aquifère
Sables de Beauchamp médians	SB médian	Semi-perméable
Sables de Beauchamp inférieurs Marnes et Caillasses Calcaire Grossier	Lutétien	Aquifère
Calcaire Grossier basal Argile de Laon	AL	Semi-perméable
Sables Supérieurs	Yprésien supérieur	Aquifère
Fausses Glaises	FG	Semi-perméable
Sables d'Auteuil	Yprésien inférieur	Aquifère
Argile Plastique Marnes de Meudon	MM - AP	Semi-perméable
Craie Blanche de Meudon	CB	Aquifère

**Tableau 2. 8: description des onze couches du modèle hydrogéologique.**

### 2.2. Maillage

Afin de structurer notre modèle mathématique d'écoulement, nous avons maillé les 11 couches en mailles carrées de 50 m de côté (Figure 2. 8 et Figure 2. 9). Dans un premier temps, nos couches sont délimitées par l'extension des formations géologiques sur le domaine modélisé sans tenir compte de l'existence de zones naturellement asséchées (Figure 2. 10, Figure 2. 11). Dans ces conditions, le modèle se compose de 627 089 mailles.

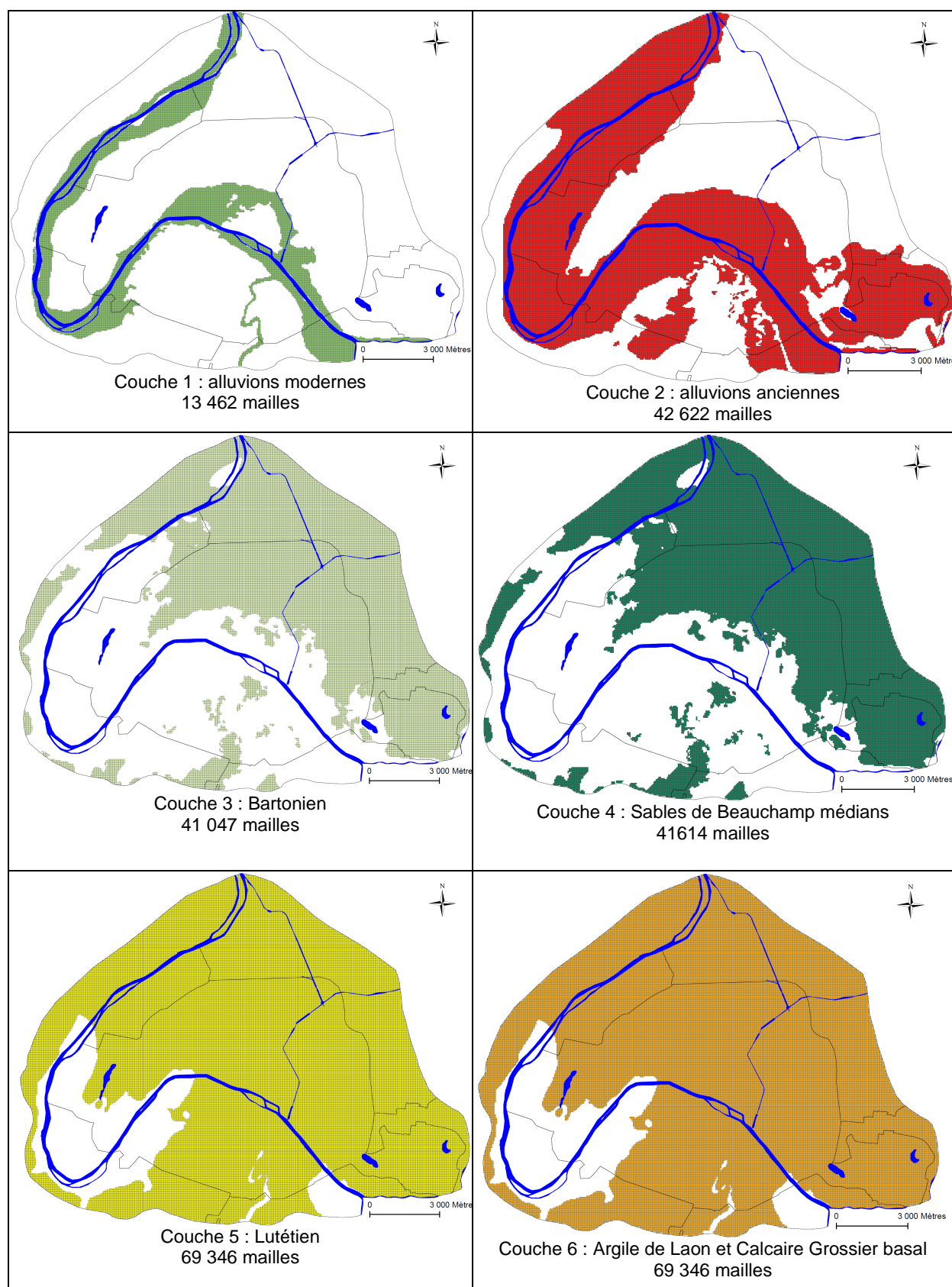


Figure 2. 8: Extension des 6 premières couches du modèle incluant les zones naturellement asséchées.



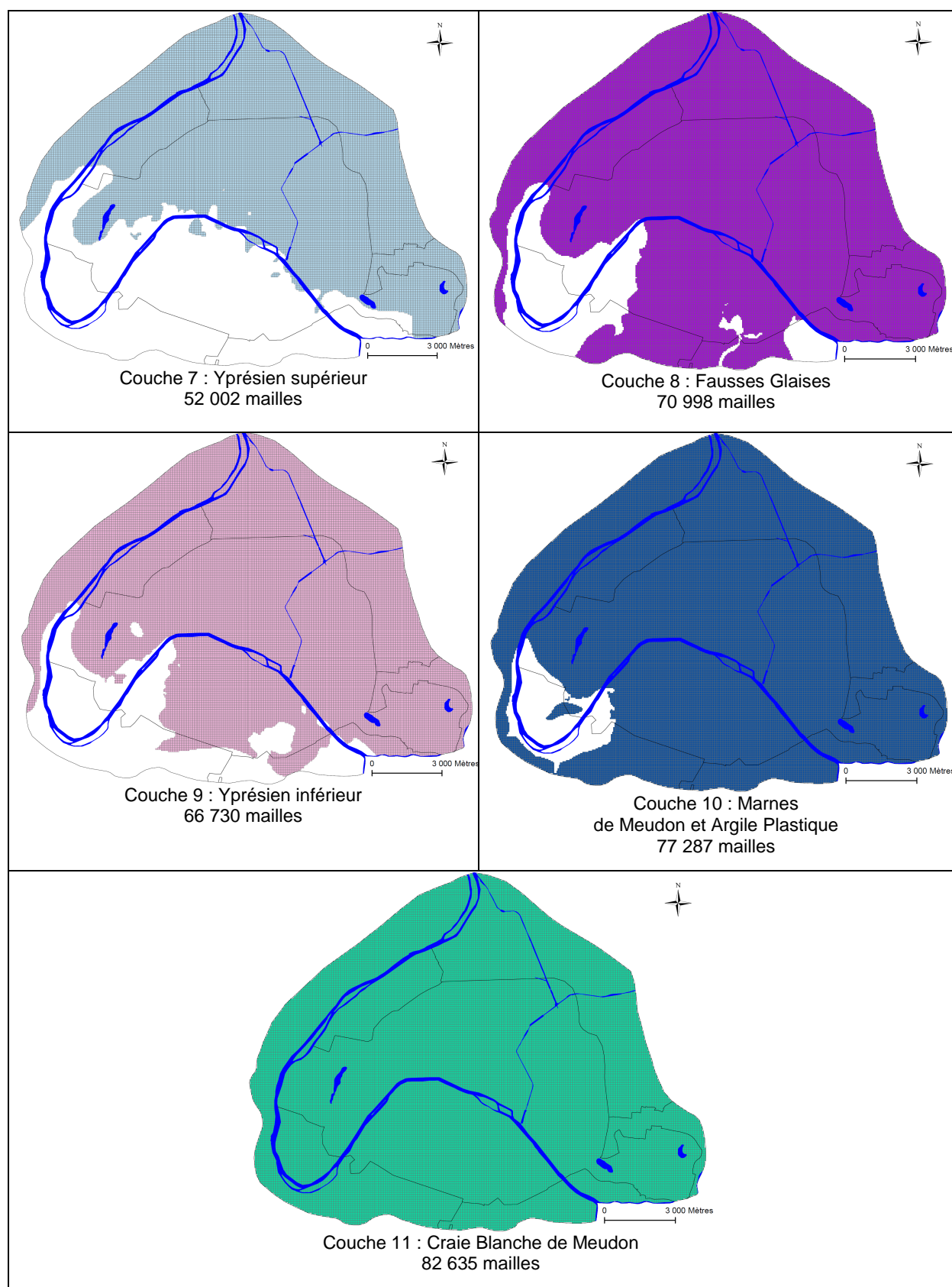
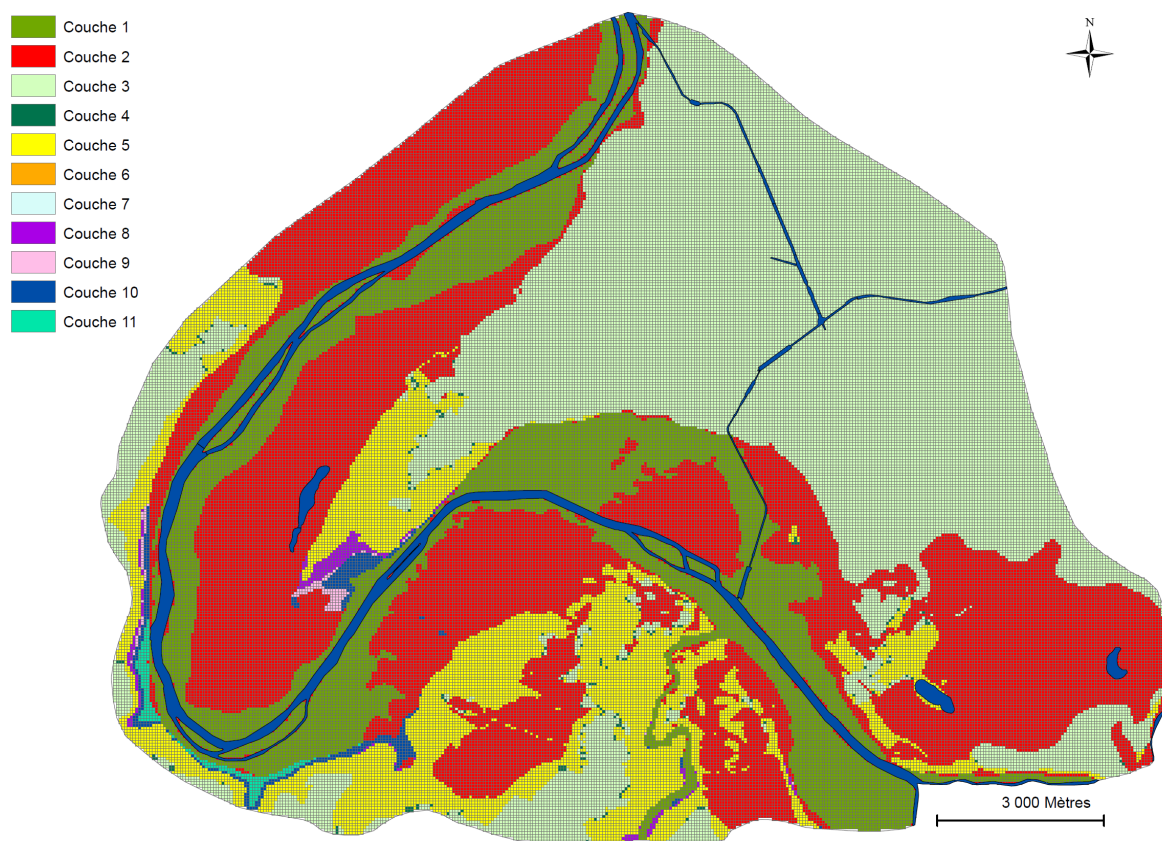
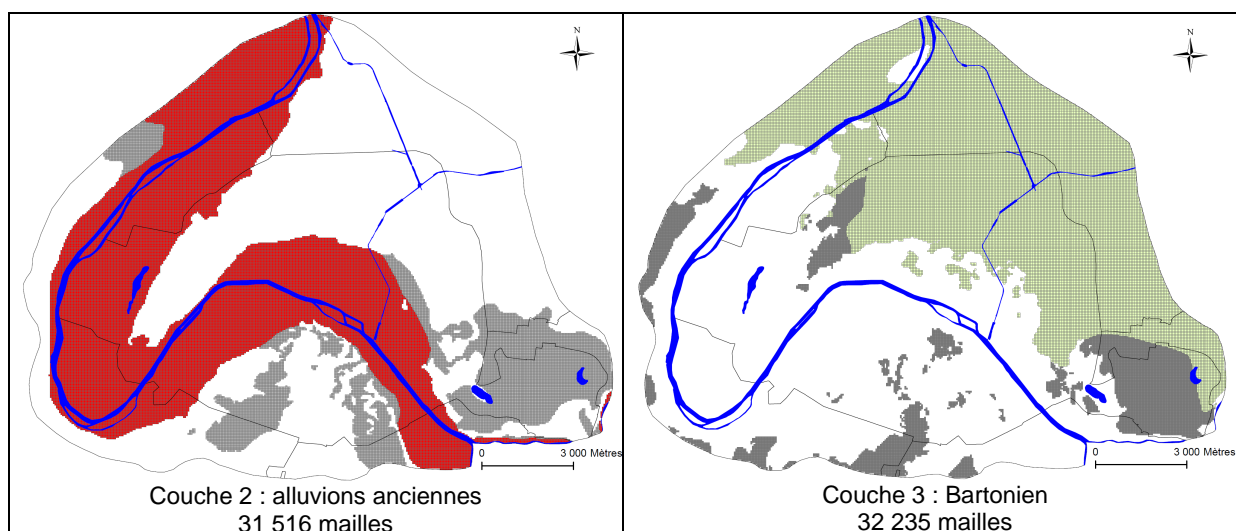


Figure 2. 9: Extension des 5 dernières couches du modèle incluant les zones naturellement asséchées.



**Figure 2. 10: Extension des entités hydrogéologiques du modèle (vue 2D).**

Dans un second temps, afin de rendre le modèle représentatif des écoulements réels, nous avons exclu les zones naturellement asséchées dans la couche 2 et la couche 3 (Figure 2. 11). Rappelons que ces zones asséchées concernent les formations superficielles pour lesquelles le niveau piézométrique de la nappe est inférieur à la cote du mur des formations géologiques. Ces zones se trouvent essentiellement au niveau des terrasses hautes qui ne seraient pas envoyées au moment des crues. Quelques zones situées au Nord du Bois de Vincennes devraient être éventuellement réintroduites pour des simulations en très hautes eaux.



**Figure 2. 11: Couches 2 et 3 sans les mailles naturellement asséchées figurées en gris.**

Cette modification des couches a réduit le nombre total de mailles. Au final, notre modèle se compose de 11 couches comportant 607 171 mailles réparties entre les couches selon les indications du Tableau 2. 9.

Nom de la couche	Nombre de mailles
Alluvions modernes	13 462
Alluvions anciennes	31 516
Bartonien	32 235
SB médian	41 614
Lutétien	69 346
Argile de Laon	69 346
Yprésien supérieur	52 002
Fausses Glaises	70 998
Yprésien inférieur	66 730
MM - AP	77 287
Craie Blanche	82 635
<b>Nombre total de mailles</b>	<b>607 171</b>

Tableau 2. 9: Nombre de mailles par couches.

La Figure 2. 12 nous montre une superposition des couches affleurantes en 2 dimensions. Quant à la Figure 2. 13 et à la Figure 2. 14, elles nous permettent de visualiser l'agencement géométrique du modèle, avec ou sans les alluvions, en 3 dimensions.

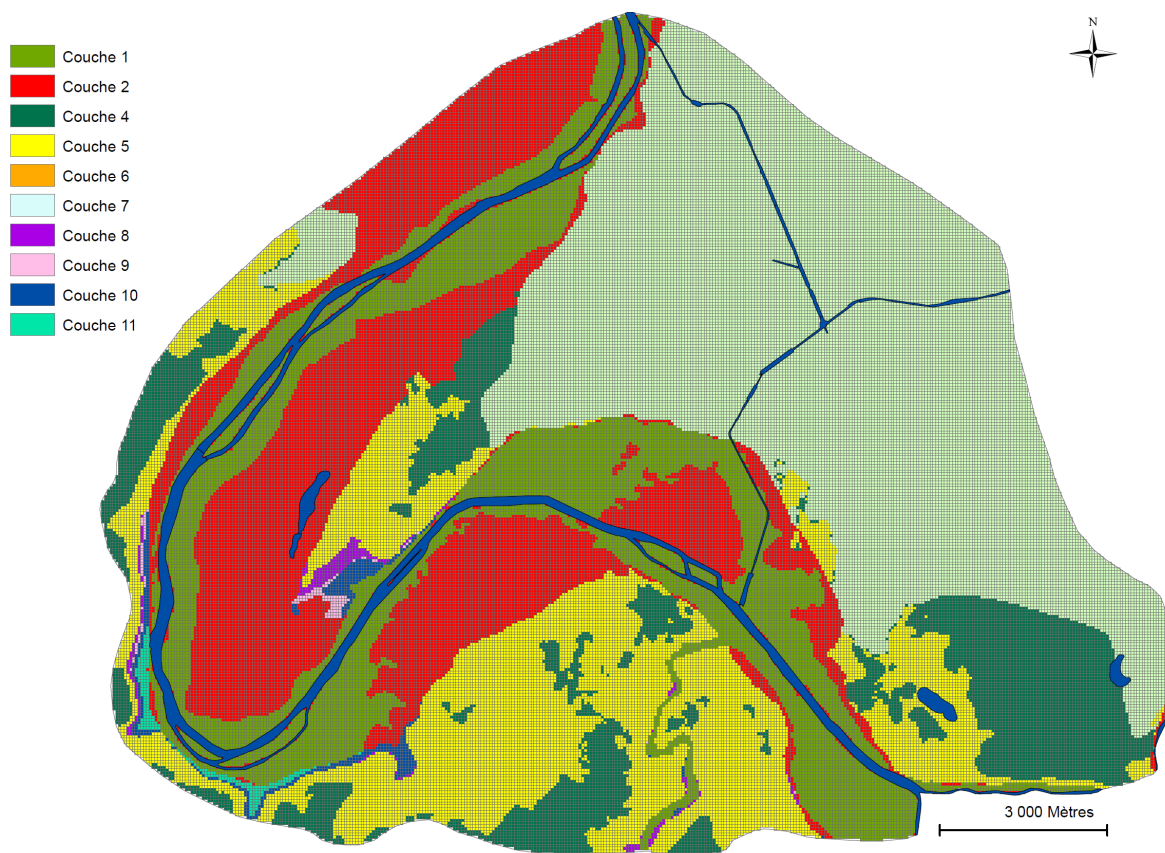


Figure 2. 12: Cartographie des couches du modèle (2D).



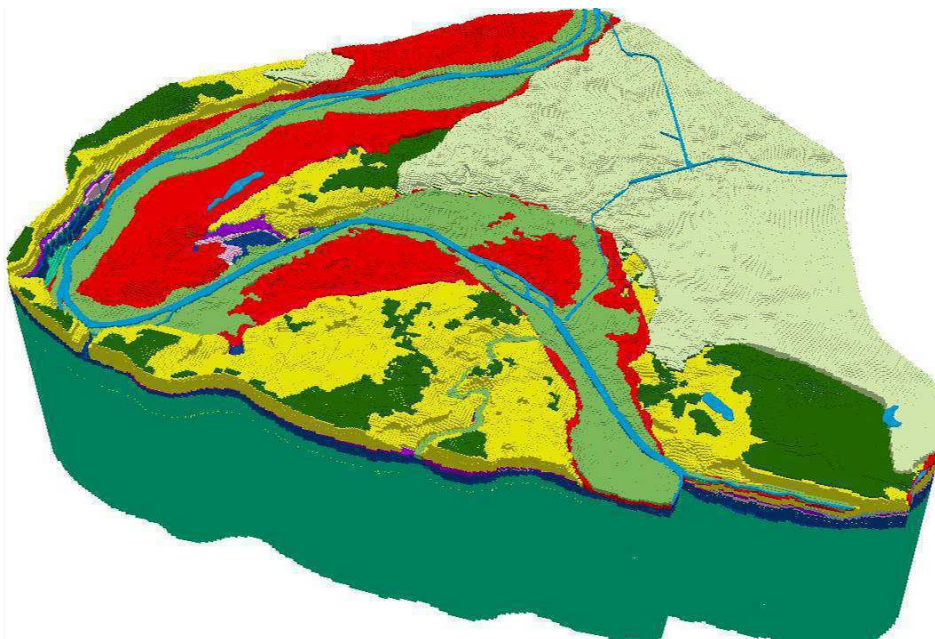


Figure 2. 13: Bloc en 3 dimensions du modèle.

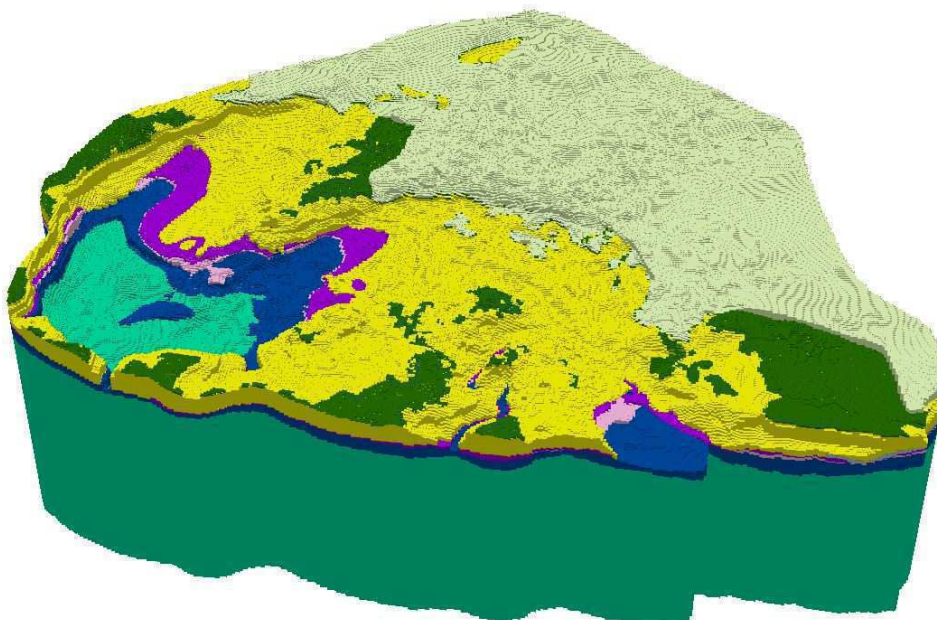


Figure 2. 14: Bloc en 3 dimensions du modèle sans les alluvions et la Seine.

### 2.3. Conditions aux limites

Les formations aquifères modélisées, possèdent, hormis les alluvions, une étendue géographique régionale. Cela implique la nécessité de fixer des limites à notre zone d'étude qui ne coïncide pas avec un bassin versant, sur d'autres critères. Les conditions aux limites ainsi définies ne correspondent pas à des conditions hydrauliques bien identifiées. Nous avons veillé à ce qu'elles permettent de restituer au moyen du modèle l'écoulement général des nappes identifiables sur les cartes piézométriques, tout en se plaçant à une distance suffisante, adaptée à la simulation des aquifères dans Paris intra-muros.

Nous avons ainsi choisi des limites qui correspondent :

- Au sud, à l'axe de l'anticlinal de Meudon que nous considérerons comme déterminant une crête piézométrique, soit une limite à flux nul.
- Au nord-est, à l'axe du synclinal de Saint-Denis pour lequel nous avons imposé une limite à flux nul pour la nappe superficielle du Bartonien et une limite à potentiel imposé pour les nappes inférieures du Lutétien, de l'Yprésien et de la Craie de Meudon, fixé d'après les données piézométriques disponibles.
- Au nord-ouest à l'axe de la boucle de Gennevilliers où le toit de la Craie de Meudon forme un léger bombement. Nous avons également considéré cette limite marquée par une crête piézométrique comme une limite à flux nul.
- A l'est une limite à flux nul recoupant les buttes témoins du Ludien. Cette limite possède un caractère arbitraire qui sera discuté lors de la phase de calage exploratoire du modèle.

La relation avec la Seine, la Marne, les canaux et les lacs qui sont susceptibles d'être en connexion hydraulique avec les nappes est représentée par des conditions de drainage. Il est ainsi attribué aux mailles concernées une cote NGF de drainage correspondant à l'altitude du plan d'eau et un coefficient de transfert. Le coefficient de transfert mesure la conductivité hydraulique de la connexion nappe-rivière ; il est destiné à être ajusté lors du calage du modèle.

### 2.4. Base de données du modèle hydrodynamique

Afin de paramétrer notre modèle, nous avons associé un fichier d'attributs à chaque couche contenant les paramètres nécessaires à la modélisation. Ces informations sont affectées à chaque maille et organisées selon la structure indiquée dans le Tableau 2. 10. Elles concernent :

- Les coordonnées géographiques du centre de la maille.
- L'épaisseur de la formation géologique, ainsi que la cote de son toit et de son mur.
- Le type d'occupation du sol sur la maille servant à distinguer le mode de recharge de l'aquifère (espaces verts, cours, voiries - Figure 2. 15).
- Les zones où le Bartonien et les alluvions anciennes sont asséchées dans l'objectif de renseigner un modèle d'alimentation surfacique du Bartonien
- Les zones où le Bartonien se trouve sous couverture (Ludien seul ou Ludien et Stampien)
- La présence d'un plan d'eau ainsi que sa nature (Seine, Marne, lac, Canal) et sa cote.
- L'existence d'un métro, la surface qu'il occupe sur la maille, ainsi que son orientation (Figure 2. 16)
- La présence de bâti souterrain, son type (parking, cave, station ...), sa superficie, son volume et la proportion qu'il y occupe par rapport à la maille (Figure 2. 17, Figure 2. 18). Nous noterons qu'il n'est pas indiqué dans cette base si le bâti interfère ou non avec la nappe.
- Le volume annuel des pompages et la nature du préleveur (parking, métro...).
- La topographie
- L'épaisseur des alluvions anciennes asséchées (ep\_4).



Paramètres	Nom utilisé	Format	Légende										
Indices	Indices	réel simple											
Centroïde X de la maille	X	réel double											
Centroïde Y de la maille	Y	réel double											
Maille contour	contour	entier court	1/0										
Numéro de la maille contour	num_conto	réel simple											
Epaisseur formation géologique	épaisseur	réel double											
Cote du toit de la formation géologique	z_toit	réel double											
Cote du mur de la formation géologique	z_mur	réel double											
Volume de la maille	vol_maille	réel double											
Maille affleurante	affleurant	entier court	0 = non affleurant										
			1 = affleurant										
			2 = Bartonien recouvert par du Ludien										
			3 = Bartonien recouvert par du Ludien et du Stampien										
			4 = zone recouverte par des aa asséchées										
			5 = zone recouverte par du Bartonien asséché										
			6 = zone recouverte par du Bartonien et des aa asséchés										
Nature du sol à l'affleurement	nature_sur	texte	Seine / Rue / Cours / Bâti / Parc										
Présence de rivière à l'affleurement	Seine	entier court	1/0										
Nature du cours d'eau à l'affleurement	nature_eau	texte	Seine / Marnes / lac / Canal Saint-Martin										
Côte du cours d'eau	cote_Seine	réel double											
Présence du métro	métro	entier court	0 = sans métro										
			1 = avec métro										
			2 = métro recoupant deux formations géologiques d'une couche modèle										
			3 = métro recoupant trois formations géologiques d'une couche modèle										
Superficie du métro dans la maille	sup_métro	réel double											
Azimet du métro	orien_métr	texte	N-S / E-W / NE-SW / NW-SE										
Présence de bâti	bati	entier court	1/0										
Type de bâti	objet_bati	texte	parking public / parking résidentiel / cave / station / autre										
Volume du bâti	vol_bati	réel double											
Pourcentage d'occupation maille/bâti	occ_bati	réel double											
Présence de pompage dans la maille	pompages	entier court	1/0										
Volume prélevé dans la maille	vol_eau	réel double											
Nature du bâtiment prélevant eau	objet_pomp	texte	parking public / parking résidentiel / cave / station / métro / autre										
Topographie	topo	réel double											
N° de le maille du modèle NEWSAM	maille_new	réel simple											
Formation asséchée	Sèche	entier court	1/0										
Epaisseur formation géologique 1	ep_1	réel double	am	aa	SB <sub>sup</sub>	SB <sub>med</sub>	CG	CG <sub>inf</sub>	SS	FG	SA	MM	CB
Epaisseur formation géologique 2	ep_2	réel double			SO	Bartonien sec	MetC	AL				AP	
Epaisseur formation géologique 3	ep_3	réel double			Ludien		SB <sub>inf</sub>						
Epaisseur formation géologique 4	ep_4	réel double			aa sec	aa sec	aa sec	aa sec	aa sec	aa sec	aa sec	aa sec	aa sec

Tableau 2. 10: Récapitulatif des éléments de la base de données du modèle



Figure 2. 15: Cartographie de l'occupation au sol projetée sur le maillage.

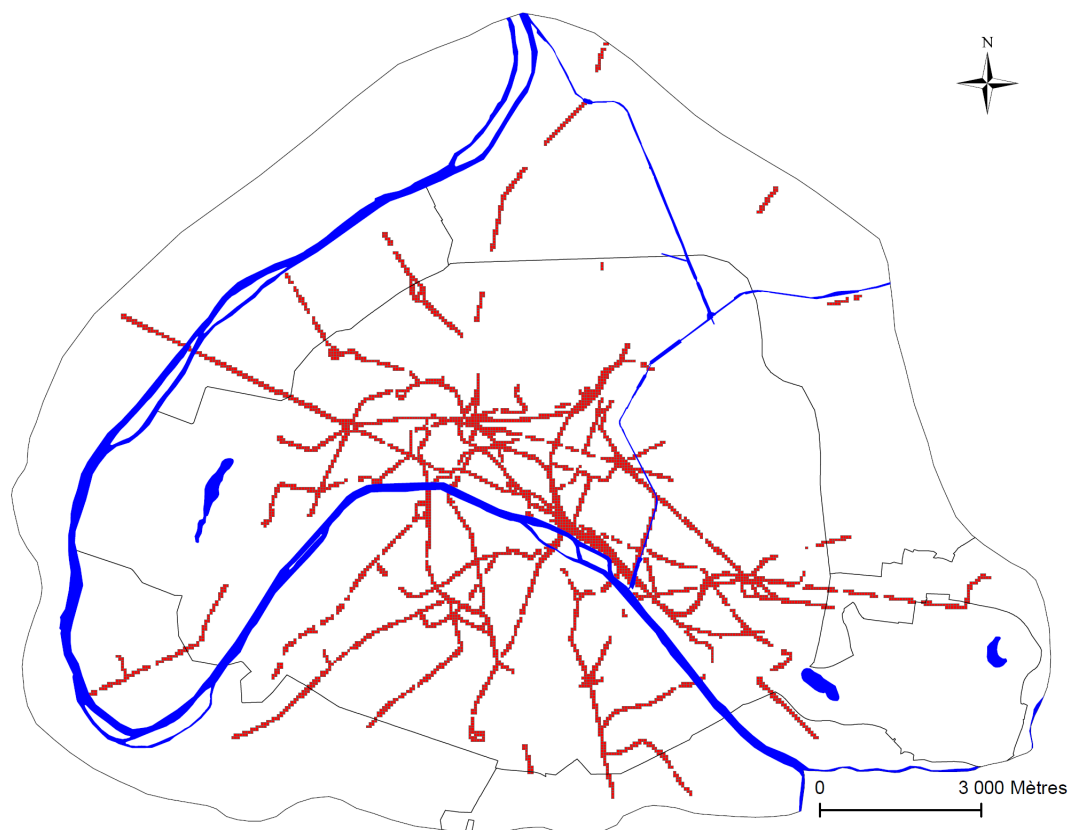


Figure 2. 16: Cartographie du réseau ferroviaire souterrain projeté sur les mailles.

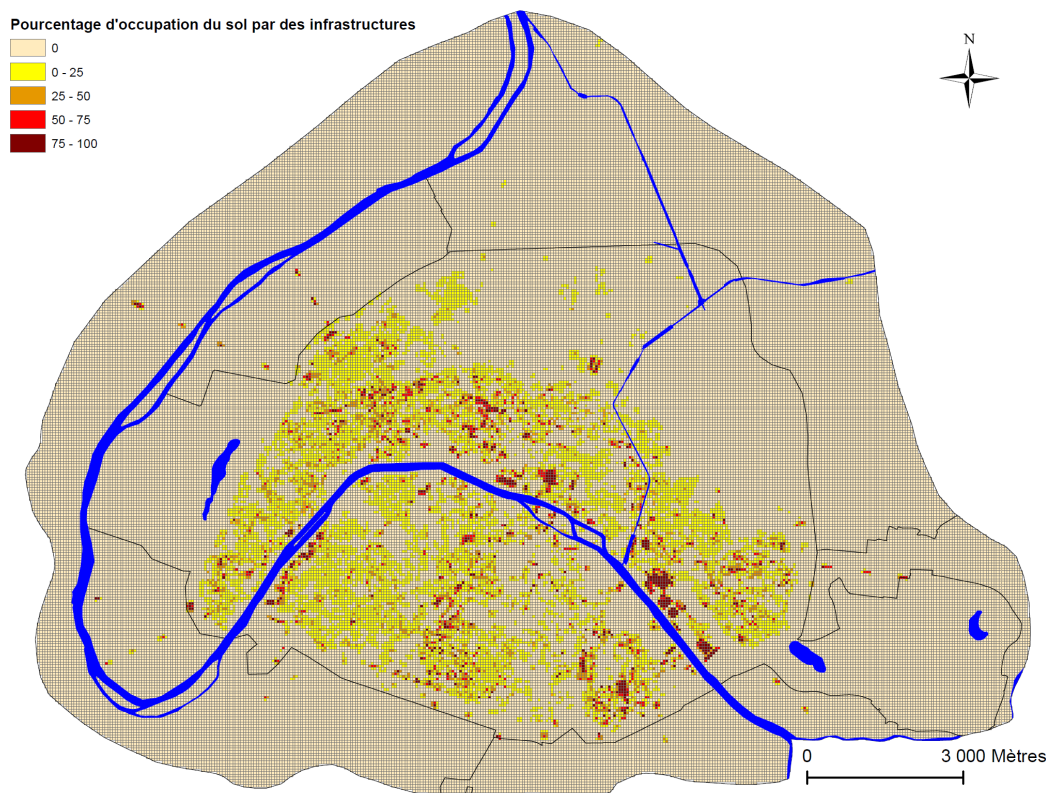


Figure 2. 17: Cartographie de l'occupation du sous-sol par les parkings, les caves et les stations ferroviaires projetée sur le maillage.

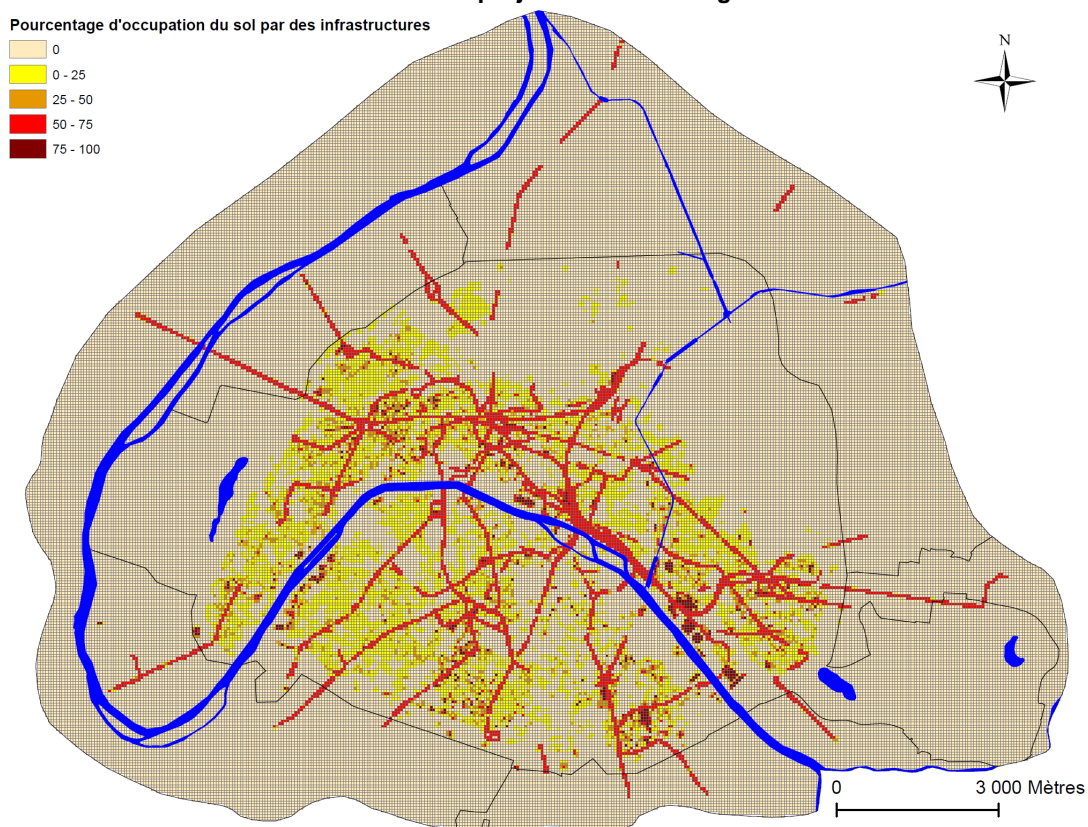


Figure 2. 18: Cartographie de l'occupation du sous-sol par toutes les structures souterraines projetée sur le maillage.

Le Tableau 2. 11 détail des formations géologiques incluses dans chaque couche. Il permet d'évaluer la transmissivité d'une couche du modèle qui présente une hétérogénéité lithologique verticale, en fonction de la perméabilité de chaque formation. Une couche contenant au plus trois formations distinctes (cas du Lutétien), trois paramètres d'épaisseur, notés ep\_1, ep\_2 et ep\_3, sont nécessaires. L'épaisseur totale sur une maille correspond à la somme de ces trois termes. Par exemple, la couche 1 des alluvions modernes ne contient qu'une formation géologique, donc ep\_1 correspond à l'épaisseur de ces alluvions. Pour la couche 3 du Bartonien, l'épaisseur correspond à la somme de ep\_1 et de ep\_2. Le tableau 2. 10 mentionne également un paramètre ep\_4 qui indique l'épaisseur des alluvions anciennes dénoyées lorsque cela est le cas. Ceci permet de calculer la transmissivité dans la couche des alluvions anciennes en fonction de son état de saturation.

	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	Couche 5	Couche 6	Couche 7	Couche 8	Couche 9	Couche 10	Couche 11
Nom de la couche	am	aa	Bartonien	SB médian	Lutétien	AL	Yprésien supérieur	FG	Yprésien inférieur	MM-AP	Craie
Epaisseur de la couche	ep_1	ep_1	ep_1 + ep_2	ep_1	ep_1 + ep_2 + ep_3	ep_1 + ep_2	ep_1	ep_1	ep_1	ep_1 + ep_2	ep_1
Formations géologiques contenues dans la couche	am	Aa	SO + SB supérieur	SB médian	SB inférieur + MetC + CG	CG inférieur + AL	SS	FG	SA	MM + AP	CB

**Tableau 2. 11: Descriptif des différents paramètres "ep" du Tableau 2.10**

Les 11 couches du modèle possèdent ainsi une base de données très détaillée sur les caractères physiques et hydrodynamiques des aquifères parisiens. Tous ces éléments rassemblent les paramètres nécessaires à la modélisation hydrodynamique.





## **Partie 3**

# **Modélisation numérique hydrogéologique des aquifères parisiens**



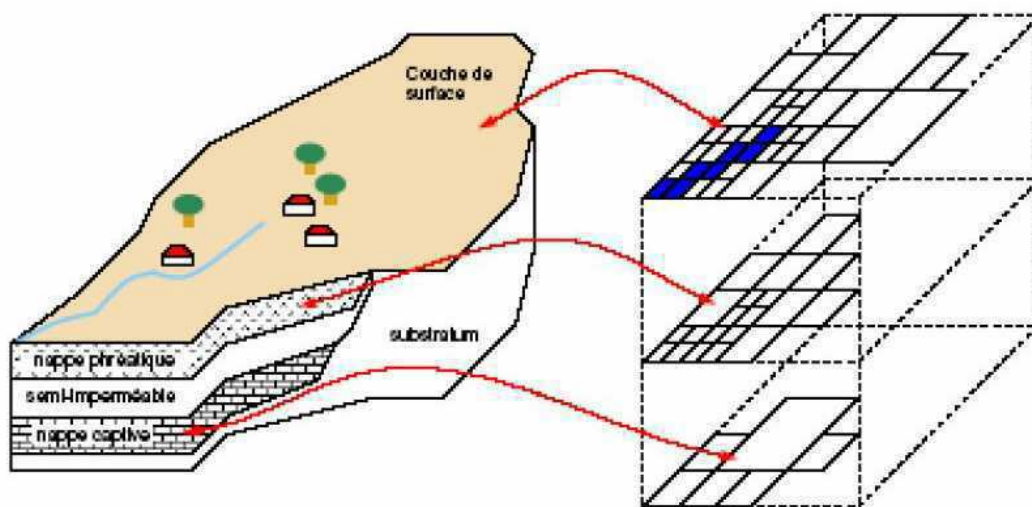
Un modèle hydrogéologique correspond à la simplification d'un système en étant forcément réducteur (Payraudeau, 2004). Il doit répondre à un problème spécifique. Le type de modèle à adopter et sa structure dépend ainsi de la question posée.

Dans cette étude, nous nous interrogeons sur le comportement des nappes à Paris et sur les variations piézométriques en cas de modification du régime actuel. Nous devons donc utiliser un modèle capable de simuler les transferts d'eau dans des systèmes multicouches tout en prenant en compte les différents paramètres influant sur ce transfert et susceptibles d'évoluer dans le temps sous l'effet de phénomènes naturels et anthropiques.

## 1. Type de modélisation

### 1.1. Code NEWSAM

Nous avons utilisé le code NEWSAM, développé par le Centre de Géosciences de MINES ParisTech. Il se base sur la loi de Darcy et simule numériquement, par la méthode des différences finies, les transferts d'eau et de masse, dans des systèmes multicouches à l'échelle régionale (Ledoux 1975, Levassor et Ledoux 1996). Le système hydrogéologique de la zone d'étude doit être discrétisé en un réseau de mailles carrées emboîtées constituant les couches souterraines connectées ou non hydrauliquement (Figure 3. 1). Les simulations peuvent se faire en régime transitoire ou permanent pour des aquifères libres ou captifs.



**Figure 3. 1: Discretisation du système aquifère en couches et mailles.**

L'intégration numérique de l'équation de diffusivité en milieux poreux permet de simuler les écoulements dans les niveaux aquifères subhorizontaux séparés par des semi-perméables. NEWSAM considère que les écoulements dans les couches aquifères sont bidimensionnels, et qu'ils sont monodimensionnels subverticaux dans les semi-perméables.

La méthode des différences finies permet de résoudre l'équation de diffusivité et de calculer en chaque point du modèle, la charge hydraulique. Pour chaque maille aquifère, nous écrivons une équation de diffusivité du type :

$$\text{div}(\overrightarrow{\overline{T} \text{ grad} h}) = S \frac{\partial h}{\partial t} + q + q_{sup} + q_{inf}$$

Avec :

$\overline{T}$  : tenseur de transmissivité en m<sup>2</sup>/s

$S$  : coefficient d'emmagasinement

$h$  : charge hydraulique en m

$q$  : débit prélevé ou injecté par unité de surface

$$q_{sup} = \frac{K_{sup}}{l_{sup}} (h - h_{sup}) \quad \text{et} \quad q_{inf} = \frac{K_{inf}}{l_{inf}} (h - h_{inf})$$

semi-perméable supérieur                      semi-perméable inférieur

$q_{sup}$  et  $q_{inf}$  : débits échangés par unité de surface à travers les semi-perméables supérieurs et inférieurs.

$l$  : épaisseur du semi-perméable considéré

$K$  : perméabilité verticale en m/s

$h_{sup}$  et  $h_{inf}$  : charges hydrauliques régnant à l'instant  $t$  dans les couches situées au-dessus et au-dessous de la couche considérée.

## 1.2. Chaîne de modélisation

La complexité de notre zone d'étude, nécessite de prendre en compte un nombre important de paramètres liés aux caractéristiques physiques de l'environnement. Développer un modèle hydrogéologique de Paris demande donc un travail préliminaire de description et de synthétisation de son milieu. Cette approche, décrite dans la Partie 1, nous a permis de conceptualiser notre zone d'étude et d'extraire 11 couches contenant 607 171 mailles. Sur chaque maille sont renseignées les caractéristiques physiques (hydrogéologique, géologiques, urbaines ...) du milieu en fonction de la couche qui lui est associée. Ce travail de conceptualisation est décrit dans la Partie 2.

Pour simuler en régime permanent le comportement des nappes de Paris et de sa proche banlieue, nous avons créé une chaîne de modélisation (Figure 3. 2) s'appuyant sur le code NEWSAM. Ce travail s'est effectué en plusieurs étapes.

- Pour utiliser la base de données des caractéristiques physiques du sous-sol parisien, nous avons extrait pour chaque couche un fichier texte correspondant aux données du Tableau 2. 10. Nous appellerons ce type de fichier « nom de la couche.txt ».
- Nous avons créé un fichier texte contenant les paramètres hydrogéologiques de chaque couche appelé « nom de la couche-creparam.don ». Nous trouvons dans ces fichiers les perméabilités horizontale et verticale, le coefficient d'emmagasinement, la porosité, les débits infiltrés (l/s/km<sup>2</sup>) en fonction de la nature de l'affleurement (espaces verts, rues et cours) et les conditions aux limites issues des cartes piézométriques de 2010 pour les mailles du contour du domaine modélisé.
- Un programme en Fortran, nommé, « creparam.f » intègre ensuite les informations des fichiers « nom de la couche.txt » et « nom de la couche-creparam.don ». Il définit, par exemple, quelles sont les mailles qui possèdent un potentiel imposé ; c'est-à-dire les mailles qui affleurent au niveau des canaux, des lacs et des rivières (Marne et Seine), ainsi que les mailles contours renseignées dans les fichiers « nom de la couche-creparam.don ». Les informations suivantes : cote piézométrique imposée, cote du mur, cote du toit, cote de drainage, transmissivité, coefficient de transfert nappe/drains, coefficient d'emmagasinement, porosité, débit injecté, débit pompé, débit limite de drainage et perméabilité verticale de chaque maille sont stockées dans les fichiers appelées « nom de la couche-param ».
- Le code NEWSAM utilise les informations contenues dans les fichiers « nom de la couche-param » pour calculer la cote piézométrique. Il établit également le bilan hydrique du modèle. Ces informations sont répertoriées dans le fichier appelé « resuper ».
- Un programme nommé « depouil.f » récupère les informations contenues dans « resuper » pour créer des fichiers que nous nommons « nom de la couche-resu.txt ». Ils correspondent aux résultats exploitables par le SIG.
- Afin de visualiser les simulations du modèle sur le SIG, nous transformons grâce au programme « txt2dbf » les fichiers « nom de la couche-resu.txt » en « nom de la couche-resu.dbf » qui sont alors exploitables dans ArcGIS par jonction à la table attributaire des éléments du maillage.
- Pour finir, nous avons décrit notre chaîne de modélisation au moyen d'un script appelé « simul.bat ».



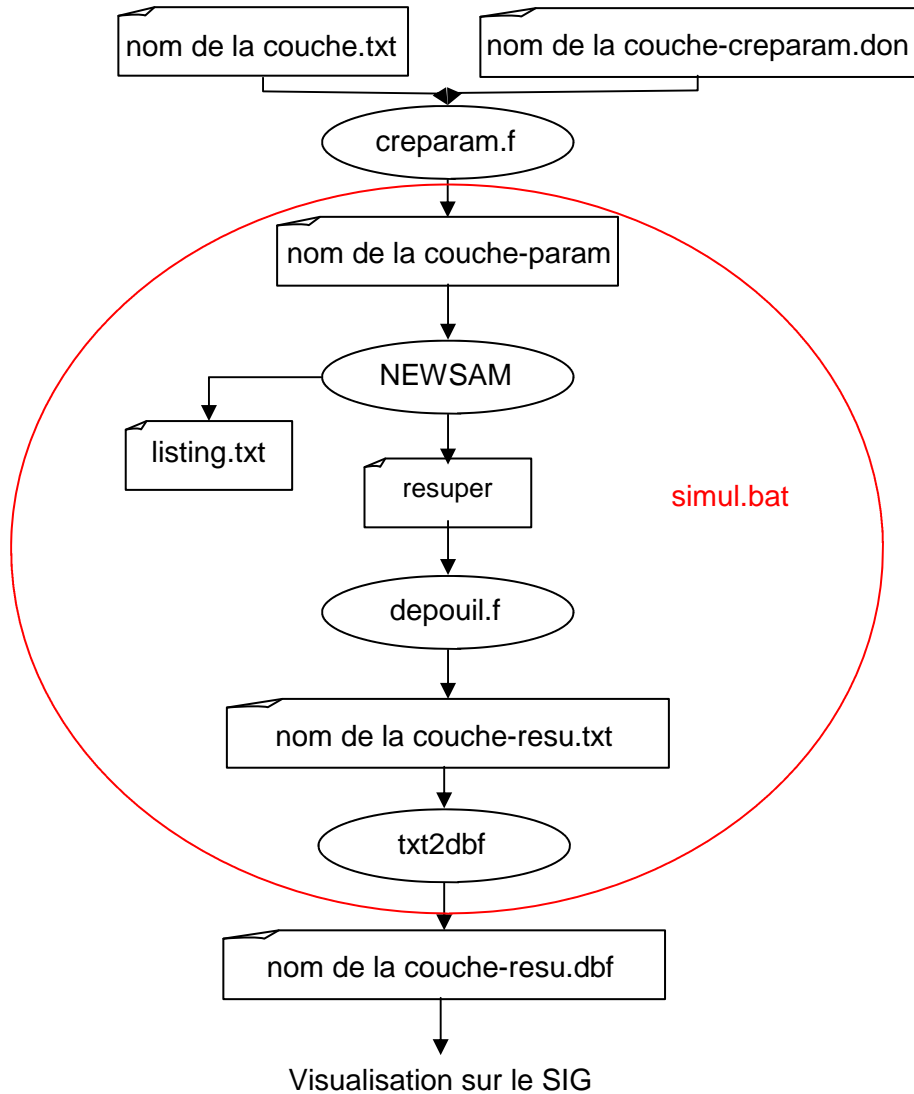


Figure 3. 2: Chaîne de modélisation décrivant la construction des fichiers de paramètres, le calcul des niveaux piézométriques et la constitution des fichiers exploitables par le SIG.

## 2. Simulations

### 2.1. Simulation initiale

Pour simuler le comportement des aquifères parisiens, nous sommes partis d'une première estimation des paramètres en se basant sur les informations bibliographiques décrites dans la Partie 1. Les valeurs retenues sont récapitulées dans Figure 3. 1. Il s'agit :

- De la perméabilité horizontale des couches provenant des valeurs médianes de 647 essais de pompages répartis sur Paris et sa proche banlieue. La perméabilité verticale est supposée être identique à la perméabilité horizontale.
- Des coefficients d'emmagasinement issus de quelques essais de pompages.

- Des porosités issues de la bibliographie. La porosité comme le coefficient d'emmagasinement n'est cependant pas utilisée pour des simulations en régime permanent.
- Des débits entrants en fonction de la nature de l'affleurement et des différentes origines de l'eau que nous avons estimés dans la Partie 1.
- Des débits pompés recensés suivant la procédure décrite dans la Partie 2.

Formations géologiques	Numéro de la couche	SP / AQ	Nom de la couche	Perméabilité (m/s)	Coefficient d'emmagasinement	Porosité
Alluvions moderne	1	SP	am	$3,1.10^{-7}$	$1.10^{-3}$	0,08
Alluvions anciennes	2	AQ	aa	$1,6.10^{-4}$	$3,6.10^{-2}$	0,25
Calcaire de Saint-Ouen	3	AQ	Bartonien	$9,5.10^{-5}$	$1.10^{-3}$	0,15
Sables de Beauchamp supérieurs						
Sables de Beauchamp médians	4	SP	SB_median	$2,5.10^{-7}$	$1.10^{-4}$	0,10
Sables de Beauchamp inférieurs	5	AQ	Lutetien	$2,5.10^{-5}$	$2.10^{-4}$	0,15
Marnes et Caillasses						
Calcaire Grossier						
Calcaire Grossier inférieur	6	SP	AL	$8,7.10^{-8}$	$1.10^{-4}$	0,05
Argile de Laon						
Sables de Cuise	7	AQ	SS	$1,1.10^{-4}$	$1.10^{-4}$	0,2
Sables Supérieurs (ou Soissonnais)						
Fausses Glaises	8	SP	FG	$6,6.10^{-7}$	$1.10^{-4}$	0,05
Sables d'Auteuil	9	AQ	SA	$1.10^{-5}$	$1.10^{-4}$	0,20
Argile Plastique	10	SP	MM_AP	$2,6.10^{-9}$	$1.10^{-4}$	0,05
Marnes de Meudon						
Craie Blanche de Meudon	11	AQ	CB	$4,1.10^{-5}$	$1.10^{-4}$	0,15

**Tableau 3. 1: Valeurs des paramètres initiaux utilisés dans la modélisation (AQ pour aquifère et SP pour semi-perméable).**

En Partie 1, sont établis les débits surfaciques d'eau pluviale qui rechargent les nappes en fonction du type de sol. Nous avons ainsi considéré les espaces verts, les cours, les rues et les toitures.

En fonction de la pluviométrie et de la superficie des espaces verts à Paris, nous avons estimé un volume moyen de pluie efficace équivalent de 2,2 millions de m<sup>3</sup>/an (ou 68,8 l/s) sur une superficie de 17,9 km<sup>2</sup>. Les cours n'étant pas totalement imperméabilisées, le débit d'eau pluviale qui

s'y infiltre est de 35,8 millions de m<sup>3</sup>/an. S'agissant des rues, nous avons estimé que les réseaux d'adduction sont implantés, sauf exception, sous la voirie et qu'ils présentent un certain nombre de fuites alimentant les nappes. Le débit perdu par les égouts dans Paris intra-muros est ainsi de 32 millions de m<sup>3</sup>/an et de presque 3 millions de m<sup>3</sup>/an pour le réseau d'eau non potable. Nous rappellerons également que la pluie alimente les nappes à travers les joints des pavés des rues pour un volume estimé à 830 000 m<sup>3</sup>/an. Quant aux toitures, nous avons considéré, que l'eau pluviale qui y ruisselle rejoint les égouts sans participer directement à la recharge des nappes. Elle est donc déjà comptabilisée dans la fuite des égouts.

Nous avons au final calculé la densité de débit injecté sur une maille, par type de surface (espaces verts, cours, rues, toitures) à partir des superficies et des volumes annuel rechargeant les nappes. Ces valeurs sont récapitulées dans le Figure 3. 2. Nous estimons que ces densités calculées dans Paris intra-muros s'appliquent également en banlieue afin de couvrir toute la superficie du modèle.

Objets surfaciques	Superficie (m <sup>2</sup> )	Volume rechargeant les nappes (m <sup>3</sup> /an)	Densité de débit injectée (l/s/km <sup>2</sup> )
Espaces verts	17 900 000	2 200 000	3,9
Cours	25 800 000	4 750 000	5,8
Rues	27 200 000	35 800 000	41,7
Toitures	31 550 000	0	0

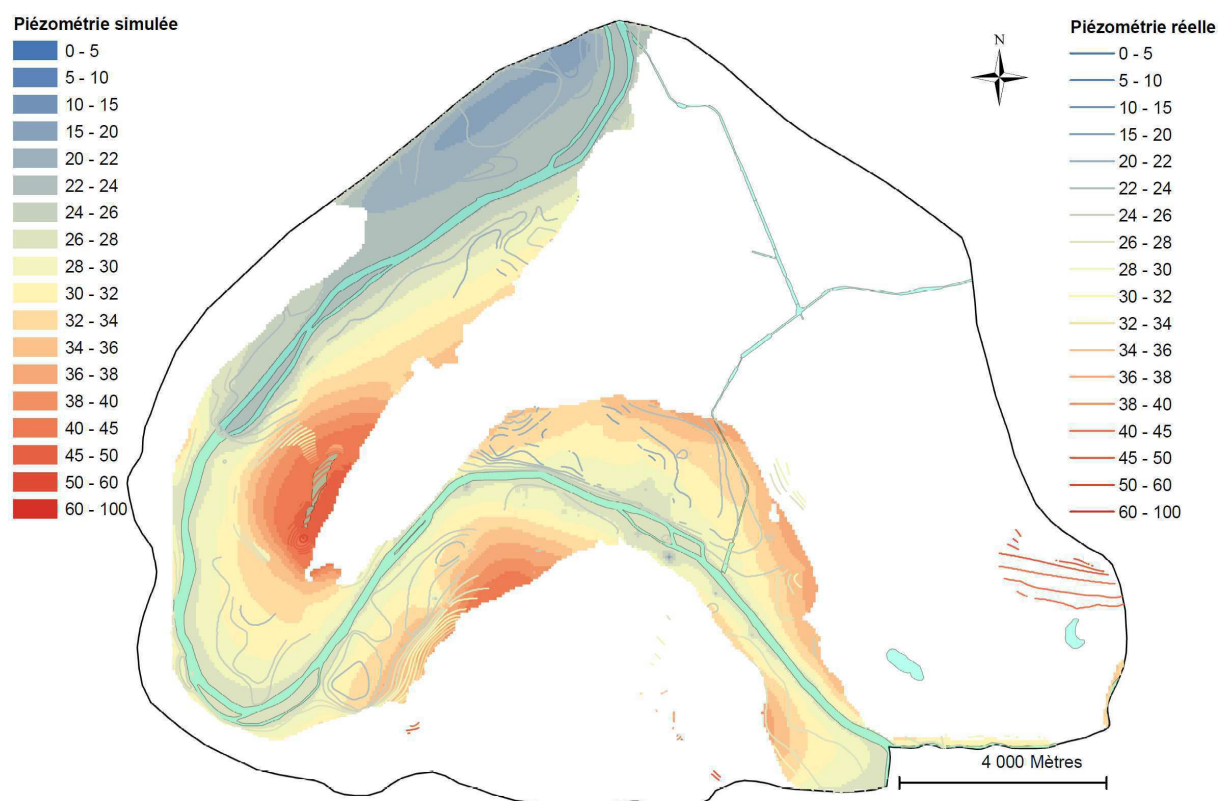
**Tableau 3. 2: Calcul des différents débits d'infiltration en fonction du type de surface.**

La zone d'étude possède une superficie de 207 km<sup>2</sup> discrétisée en 82 635 mailles de 50 m de coté.

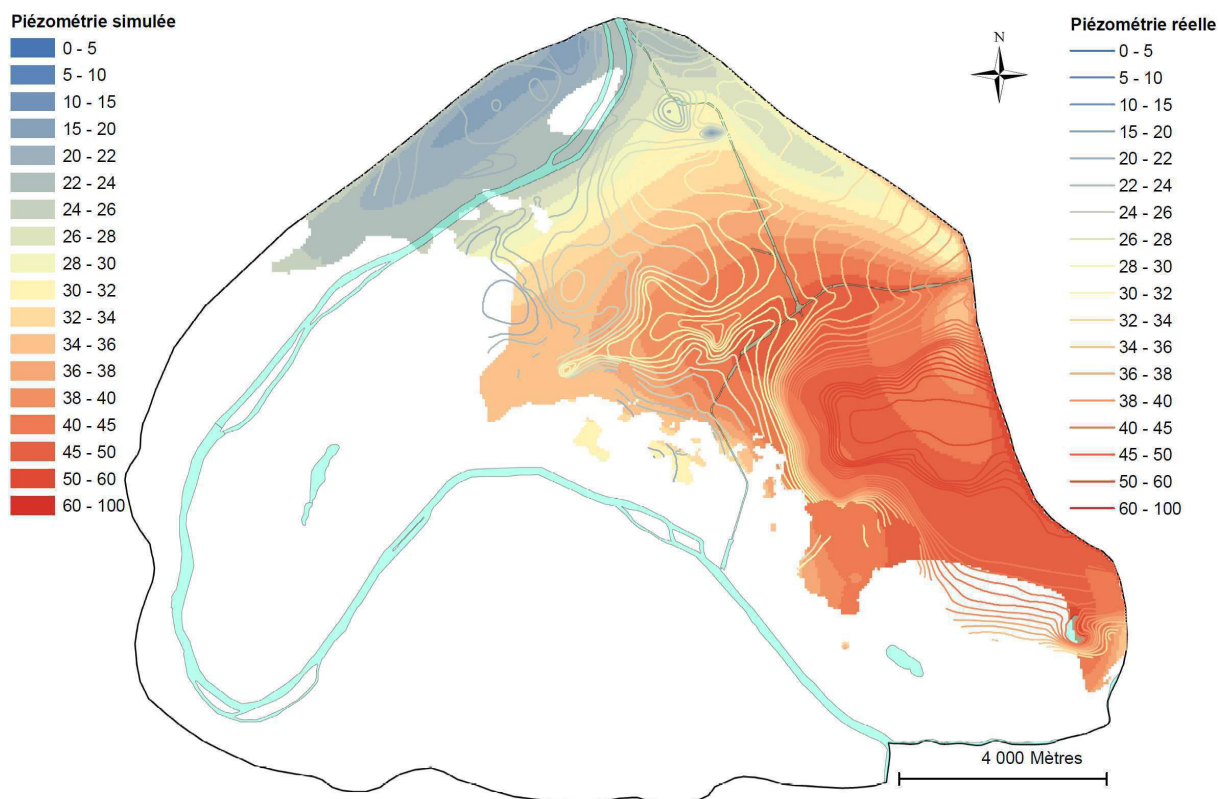
Les mailles affleurantes sont réparties de la façon suivante :

- Mailles espaces verts : 23 571
- Mailles cours : 27 498
- Mailles rues : 11 067
- Mailles toitures : 17 293
- Mailles plan d'eau: 3 206

Ces informations nous ont permis de faire une première simulation avec ces paramètres initiaux. Les résultats sont visibles sur les Figure 3. 3, Figure 3. 4, Figure 3. 5, Figure 3. 6, Figure 3. 7, et Figure 3. 8. Afin de pouvoir comparer les simulations avec la piézométrie actuelle, nous avons associé aux figures les courbes piézométriques des cartes de 2010. Les codes couleurs de la piézométrie simulée et la piézométrie réelle sont les mêmes pour faciliter les interprétations, de tel sorte que les courbes n'apparaissent que lorsqu'il existe des différences de plus de 2 mètres sur les 2 piézométries.



**Figure 3. 3: Piézométrie simulée de la nappe des alluvions anciennes avec les paramètres initiaux (les plages de couleur représentent les valeurs calculées par le modèle hydrodynamique, les courbes sont tracées à partir des valeurs observées).**



**Figure 3. 4: Piézométrie simulée de la nappe du Bartonien avec les paramètres initiaux.**

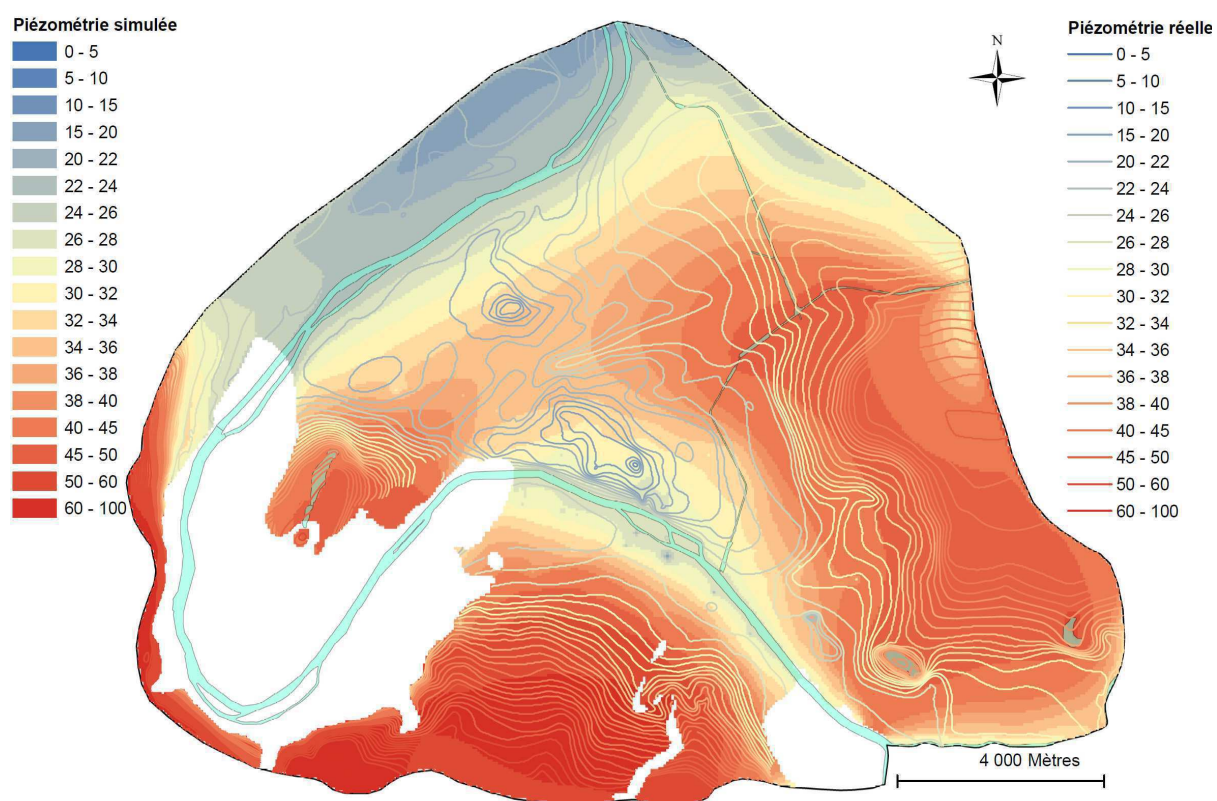


Figure 3. 5: Piézométrie simulée de la nappe du Lutétien avec les paramètres initiaux.

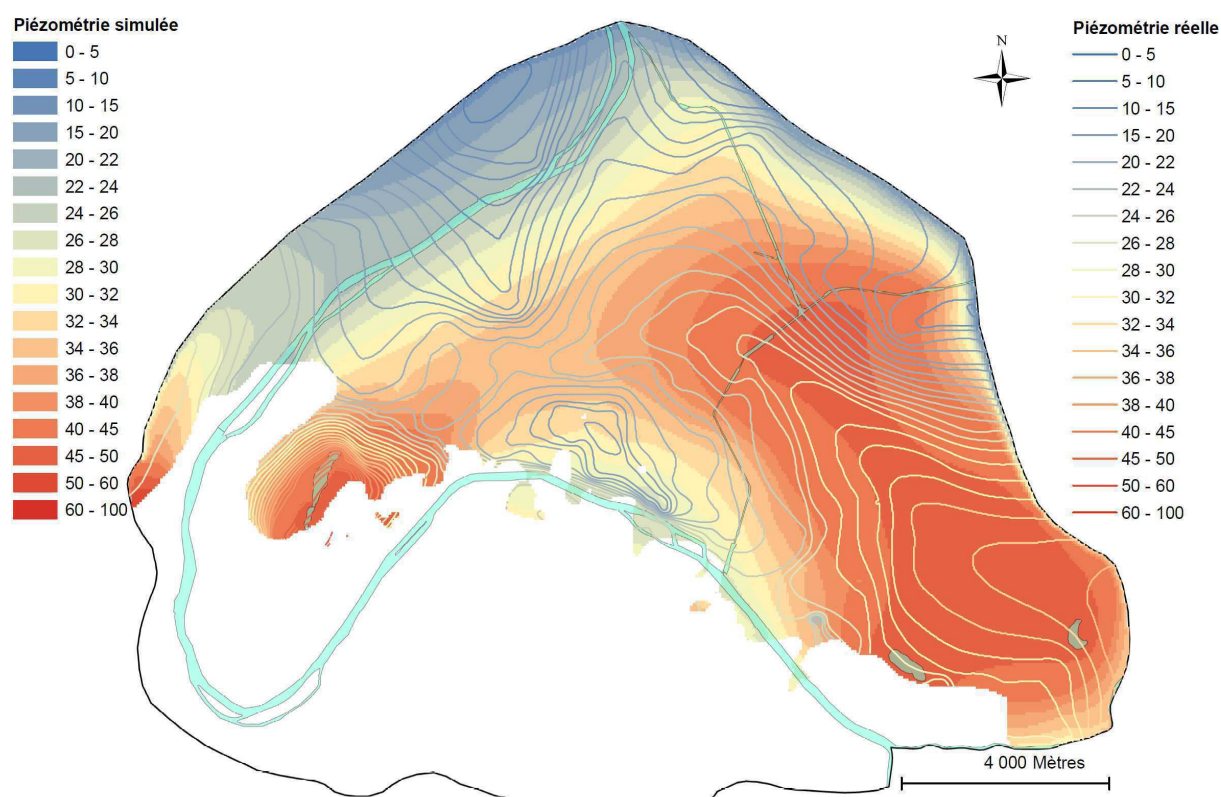


Figure 3. 6: Piézométrie simulée de la nappe de l'Yprésien supérieur avec les paramètres initiaux.



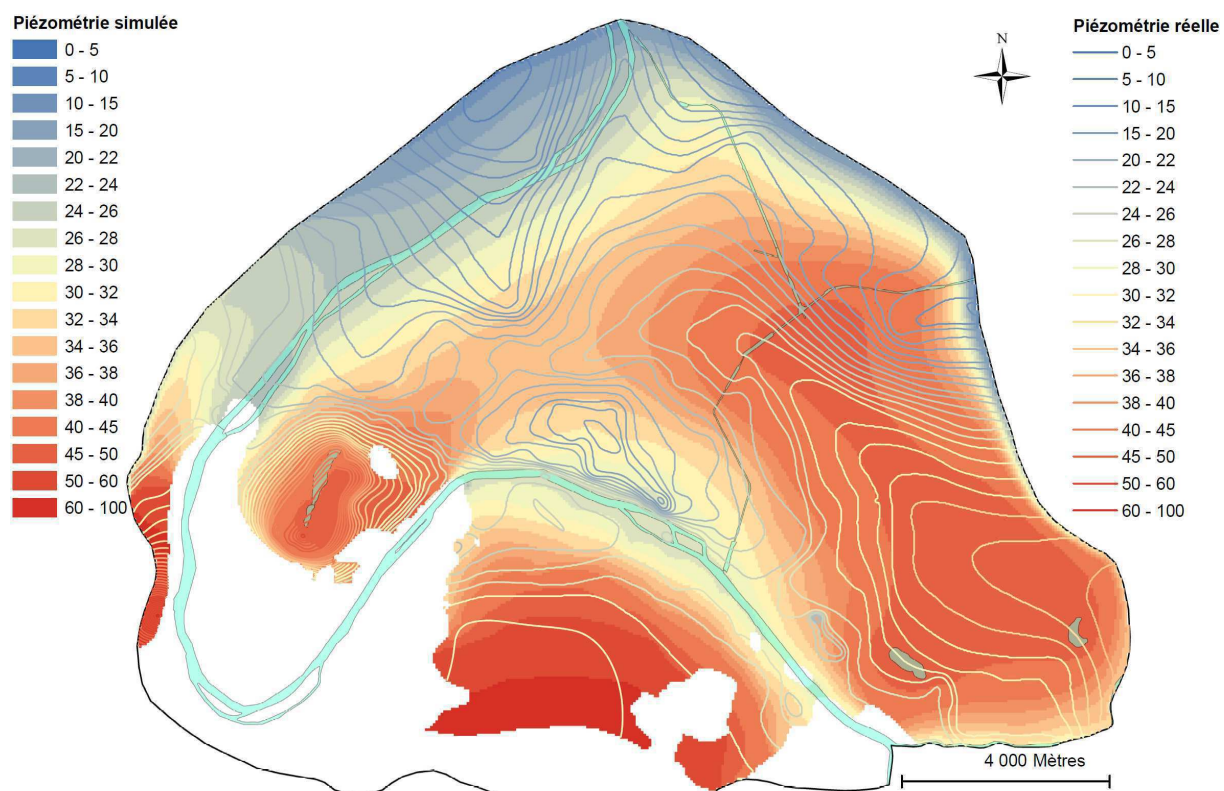


Figure 3. 7: Piézométrie simulée de la nappe de l'Yprésien inférieur avec les paramètres initiaux.

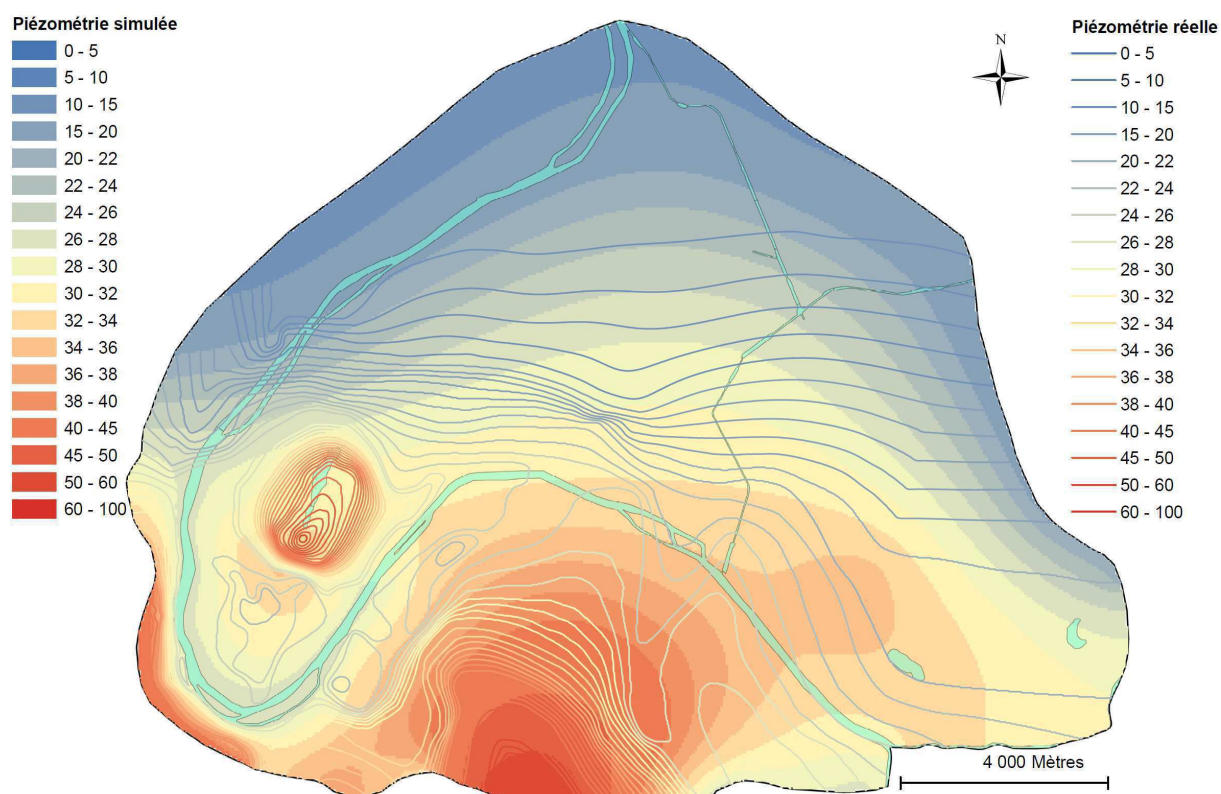


Figure 3. 8: Piézométrie simulée de la nappe de la craie avec les paramètres initiaux.

Cette première simulation présente des cartes piézométriques avec des valeurs calculées différentes de la piézométrie réelle. Nous noterons tout de même que l'allure générale des piézométries simulées est proche de celles des cartes piézométriques de 2010. Ce comportement traduit une mauvaise appréciation des paramètres initiaux. Les causes peuvent être :

- Une sous-estimation des débits d'entrée sur certains secteurs. Nous pensons par exemple à la Butte de Belleville où la piézométrie calculée apparaît particulièrement basse.
- Une sous-estimation des prélèvements d'eau. Nous n'avons introduit que les pompages déclarés. De ce fait seul un pompage sur trois est vraisemblablement pris en compte dans le modèle. Cette situation pourrait être particulièrement impactante dans le triangle compris entre la place de la Bastille, Neuilly-sur-Seine et Clichy
- Une mauvaise estimation des perméabilités. Nous rappelons ici, que nos valeurs sont issues de 647 essais de pompages effectués dans des secteurs restreints situés majoritairement sur le tracé des voies ferrées (métro et RER) et donc non nécessairement représentatives de la perméabilité moyenne d'une couche.

La géologie parisienne est très hétérogène à une échelle fine. Les formations géologiques présentent des variations de faciès, qui peuvent impliquer des changements de perméabilités au sein d'une même couche du modèle qui est considérée pour l'instant comme homogène. Nous noterons également qu'il existe une incertitude sur la représentation du drainage par le réseau hydrographique, notamment au niveau de la Bièvre qui est canalisée mais qui joue certainement encore un rôle hydraulique sur la nappe.

Il existe donc un nombre important d'incertitudes qui justifieraient un calage. Pour évaluer les pistes possibles d'améliorations du modèle, nous allons examiner ses réactions vis-à-vis de la variabilité des pompages dans le centre de Paris, de la variabilité de l'alimentation sur le secteur de Belleville et des relations entre les nappes et les cours d'eau.

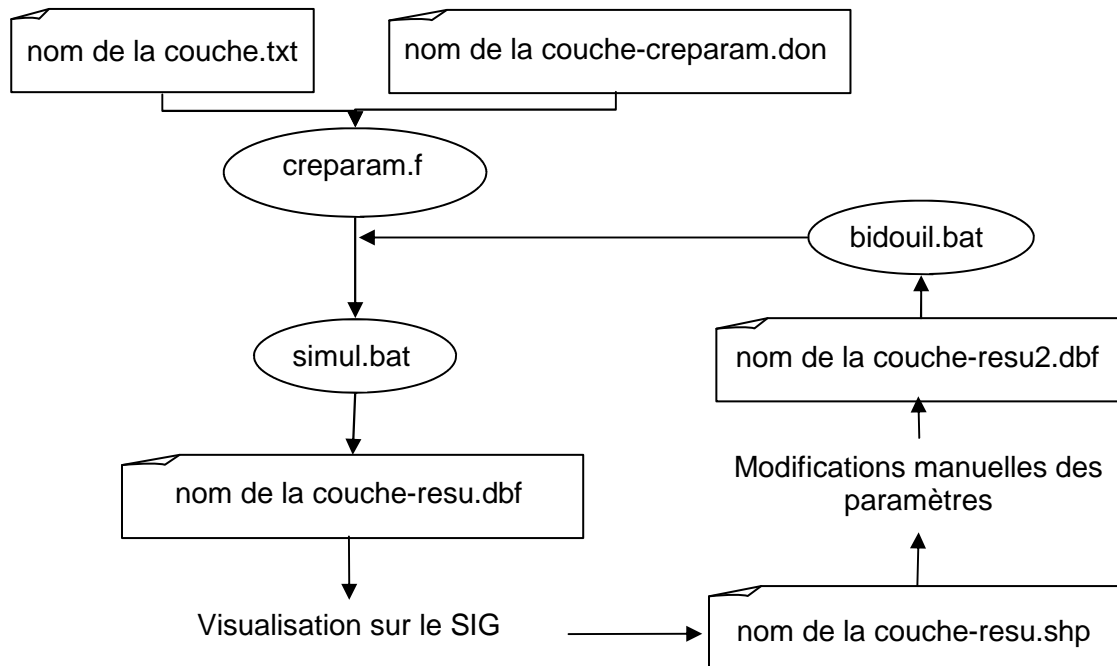
## **2.2. Simulations exploratoires de calage**

### **2.2.1. Chaîne de modélisation utilisée pour le calage du modèle**

Afin de procéder à un calage du modèle par secteur, nous avons complété notre chaîne de modélisation (Figure 3. 9). Ce travail s'est effectué en plusieurs étapes :

- Depuis notre SIG, nous avons exporté les fichiers « nom de la couche-resu.dbf » en fichiers de formes (Shape file) que nous avons appelés « nom de la couche-resu.shp ». Ceci nous permet d'éditer la table attributaire dans laquelle figure les paramètres du modèle.
- Nous calons alors notre modèle en sélectionnant et en modifiant dans cette table attributaire les paramètres requis aux endroits adéquats.
- Les fichiers « nom de la couche-resu.shp » modifiés sont ensuite exportés en fichiers dBASE nommés « nom de la couche-resu2.dbf ».

- Une procédure « bidouil.bat » transforme les fichiers « nom de la couche-resu2.dbf » en fichiers textes qui sont utilisés pour mettre à jour les fichiers « nom de la couche-param » pour une nouvelle simulation avec NEWSAM.



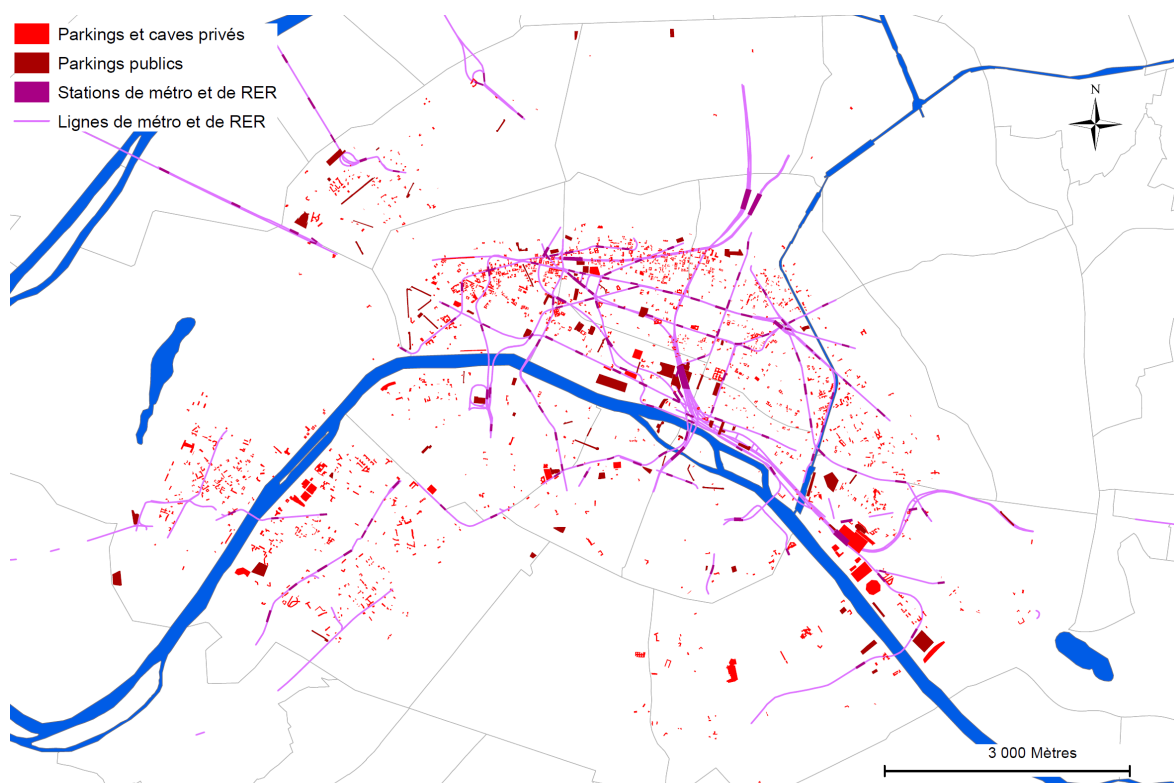
**Figure 3. 9: Chaîne de modélisation incluant la procédure de calage du modèle**

### 2.2.2. Calage exploratoire du modèle

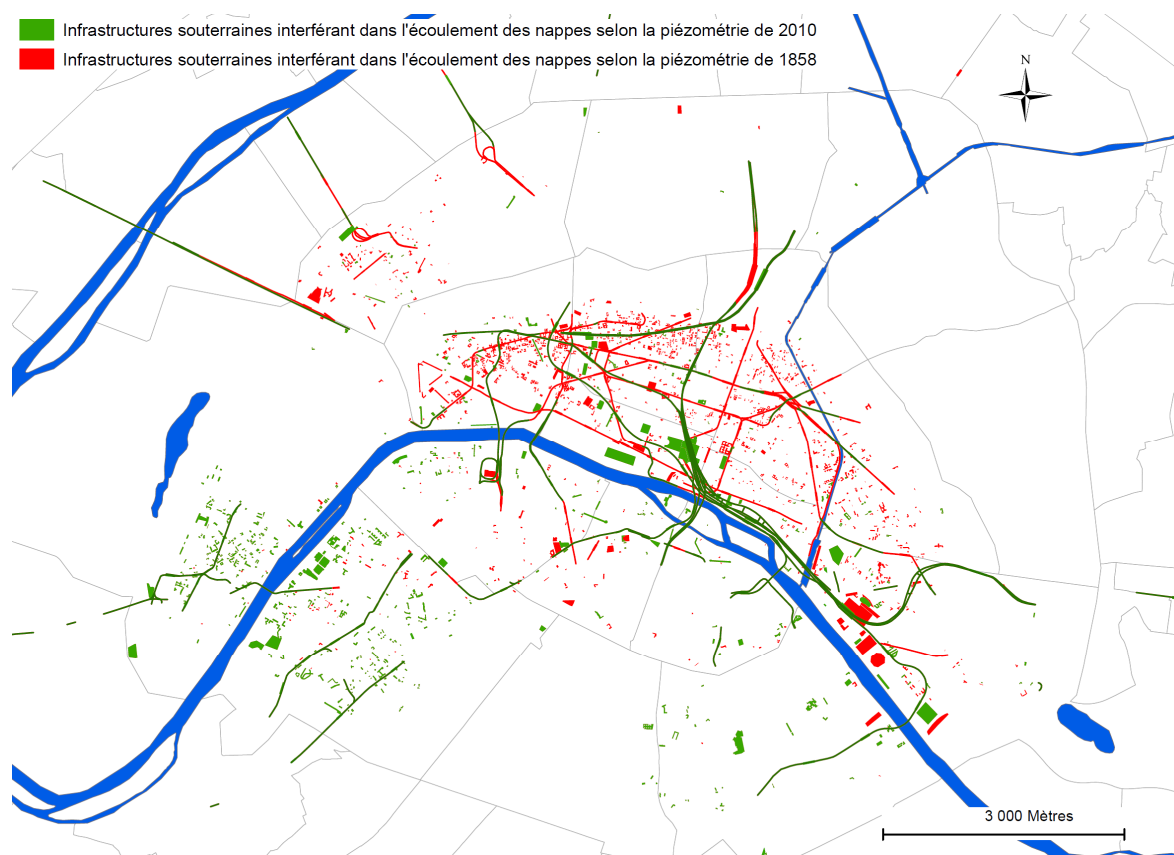
#### → Calage sur la variabilité des pompages

Nous avons identifié dans la Partie 1, 12 millions de m<sup>3</sup> d'eau prélevés annuellement sur la zone d'étude. Or la SAP estime que ces volumes sont plutôt compris entre 20 et 30 millions de m<sup>3</sup>. Afin de localiser les zones de prélèvements manquants les plus vraisemblables, nous avons déterminé quelles sont les structures souterraines qui devraient interférer avec l'écoulement des nappes en régime naturel (Figure 3. 10) et justifieraient ainsi des pompages d'exhaure. Pour cela, nous avons utilisé comme référence du niveau naturel la carte piézométrique de Delesse qui correspond à la piézométrie de 1858.

Nous avons comparé la carte des structures qui interfèrent actuellement dans l'écoulement des nappes avec la carte des structures souterraines qui devraient interférer dans l'écoulement des nappes en régime naturel et non perturbé. Ces éléments sont visibles sur la Figure 3. 11.

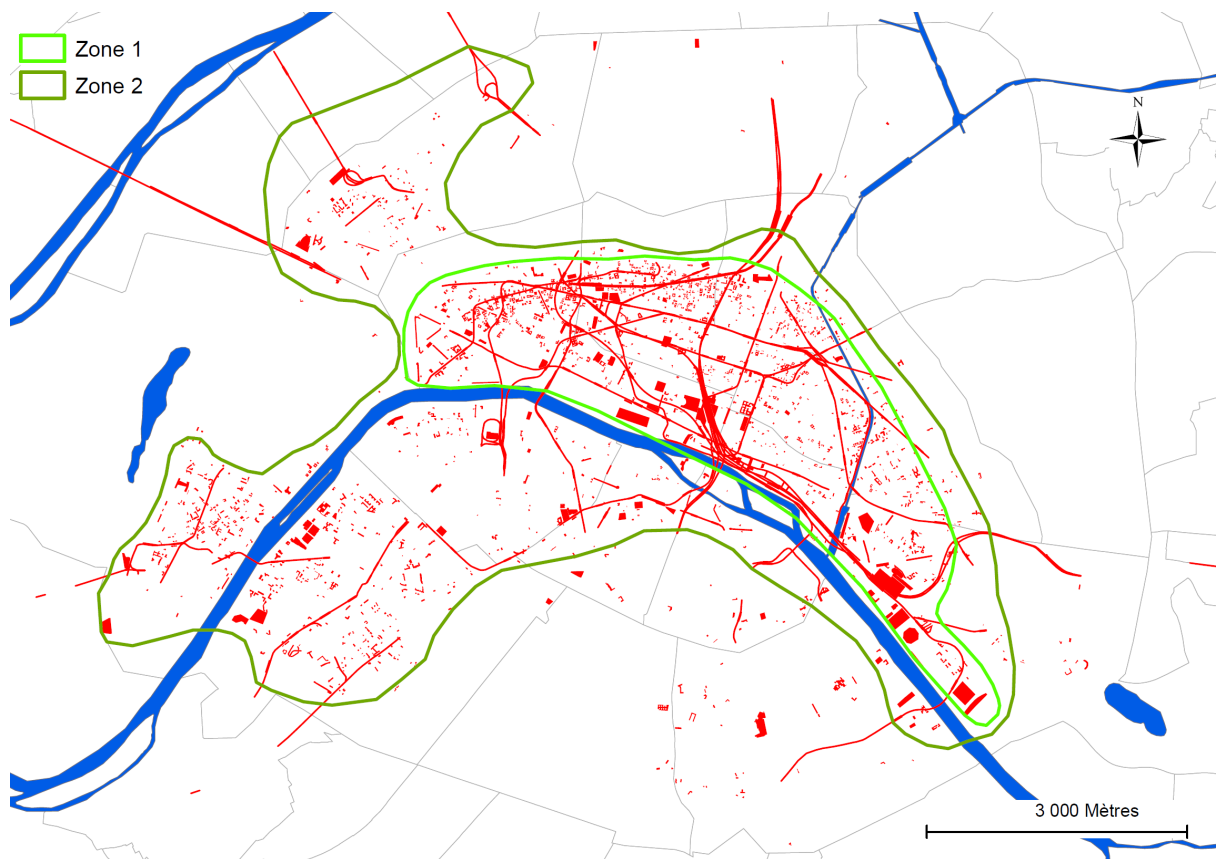


**Figure 3. 10: Carte des infrastructures souterraines interférant dans l'écoulement des nappes selon la piézométrie de 1858.**



**Figure 3. 11: Carte des infrastructures souterraines interférant dans l'écoulement des nappes selon la piézométrie de 1858 et la piézométrie de 2010.**

La Figure 3. 10 et la Figure 3. 11 révèlent que les infrastructures souterraines, qui baigneraient dans les nappes si nous nous trouvions dans la même situation piézométrique qu'en 1858, sont implantées majoritairement au centre de Paris en rive droite de la Seine, en bordure du fleuve dans les 6<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup>, 12<sup>e</sup>, 15<sup>e</sup> et 16<sup>e</sup> arrondissements ainsi que dans le nord du 17<sup>e</sup> arrondissement. Ces secteurs coïncident avec les zones où la carte piézométrique de 2010 présente des dépressions. Nous en déduisons que les zones de pompages sont liées à la présence des bâtis souterrains qui devraient interférer avec la nappe en régime naturel. Pour améliorer notre modèle, nous imposerons donc des débits de pompage, dans ces secteurs. Nous avons délimité sur la Figure 3. 12, en fonction de la densité d'infrastructures souterraines soupçonnées de posséder des pompages d'exhaures, deux zones équivalant à 40% de la surface de Paris. La zone 1 présente une densité d'infrastructures 5 fois supérieures à la zone 2, ce qui permet de penser que la densité de pompage y est également 5 fois plus importante. Après un certain nombre d'essais, nous avons au final imposé sur ces zones un débit pompé par maille de 50 m de 0,08 l/s pour la Zone 1 et 0,015 l/s pour la zone 2. Ceci a permis de restituer les dépressions piézométriques observées. En totalisant l'ensemble de ces nouveaux pompages, nous obtenons un volume annuel pompé de 22,7 millions de m<sup>3</sup>, ce qui se rapproche des 20 millions de m<sup>3</sup> non déclarés estimés par la SAP.



**Figure 3. 12: Zones de modification des débits pompés prélevés. La zone 1 impose un débit pompé par maille de 0,08 l/s et la zone 2 de 0,015 l/s.**

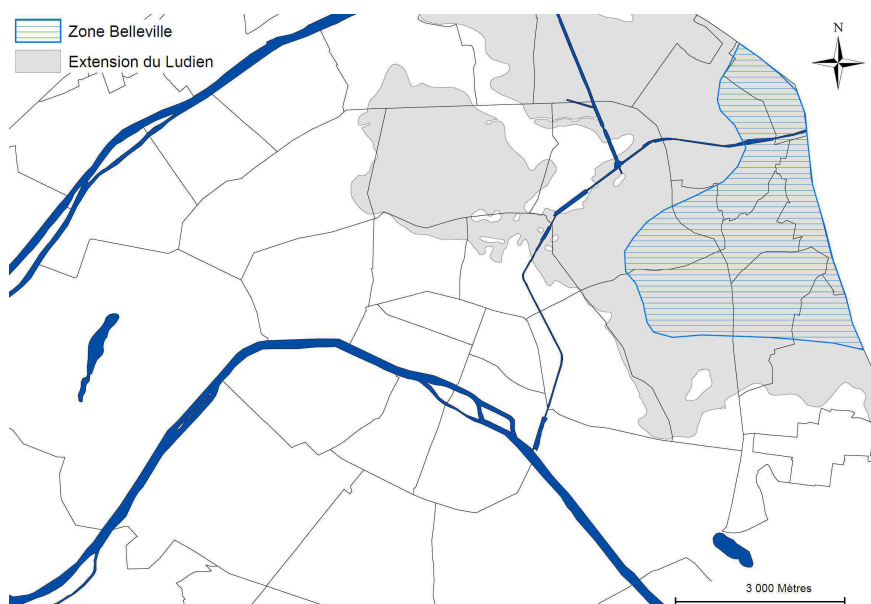


→ Calage sur la variabilité de l'alimentation du secteur de Belleville

Rappelons qu'il existe des apports latéraux sur notre zone d'étude que nous avons intégrés au modèle en imposant des charges hydrauliques sur certaines portions du contour du domaine modélisé.

Un facteur n'a cependant pas été pris en compte dans la conceptualisation du système. Il s'agit des apports latéraux sous l'effet des circulations d'eau dans les Marnes Infragypseuses en provenance de reliefs des communes avoisinantes, plus particulièrement de Romainville, de Montreuil, des Lilas et de Bobigny. Pour améliorer notre modèle, nous avons donc délimité une zone d'alimentation (Figure 3. 13) dans ce secteur que nous avons nommée « Zone Belleville » car c'est la Butte de Belleville qui présente la plus grande différence piézométrique entre les valeurs simulées et réelles.

Le débit injecté dans chaque maille concernée est au final de 0,04 l/s, soit un total de 3,6 millions m<sup>3</sup>/an d'eau dans la couche du Bartonien sur la zone Belleville. Nous constatons que le modèle réagit dans le bon sens. Il est donc probable que le modèle initial représente mal le fonctionnement du Bartonien lorsqu'il se trouve sous couverture ludienne et stampienne.



**Figure 3. 13: Zone d'alimentation de Belleville par des apports latéraux**

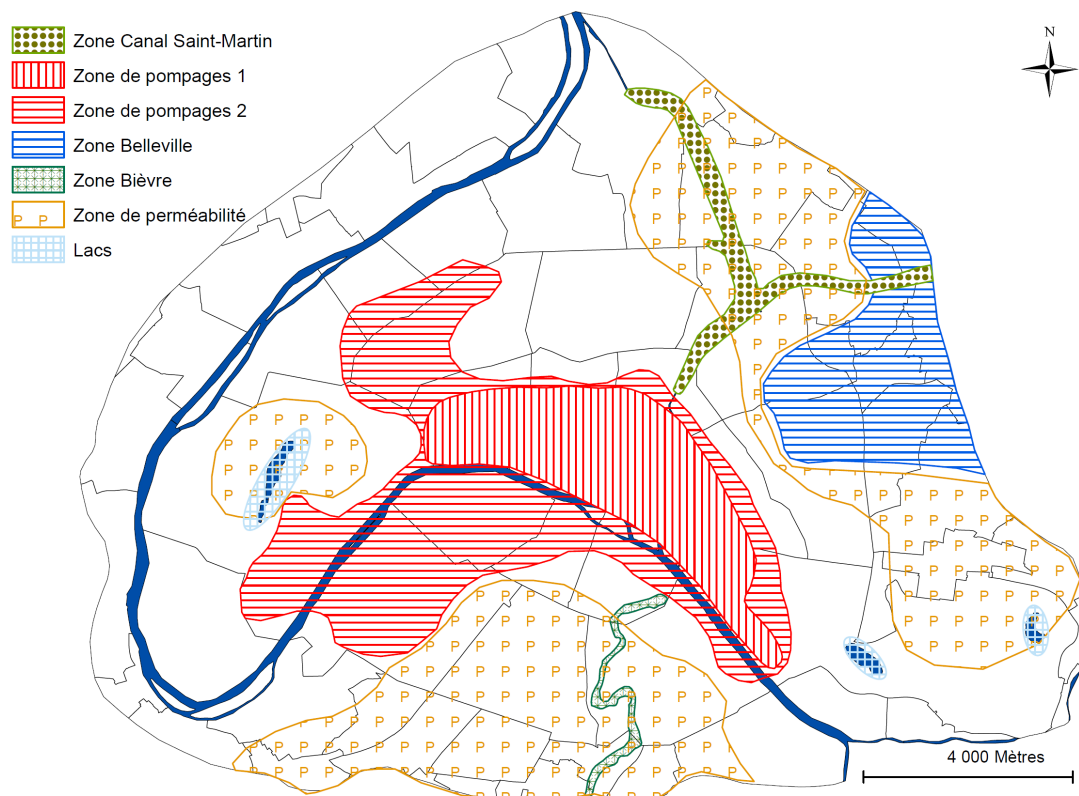
→ Calage sur d'autres secteurs

Nous avons effectué une série de calages dans d'autres secteurs présentant des discordances piézométriques avec les valeurs mesurées. Ces zones, sont :

- La Bièvre. Pour le calage de ce secteur, nous avons prescrit des potentiels imposés sur le parcours du lit naturel de la rivière dans la couche des alluvions modernes. Ces niveaux imposés correspondent au niveau piézométrique de la première nappe rencontrée est relayé par les alluvions de la Bièvre. Ils sont inférieurs à la topographie, car l'ancienne vallée de la Bièvre a été en grande partie sur-remblayée

- Les canaux et les lacs. La simulation avant calage montre des niveaux, dans les secteurs comportant le Canal de l'Ourcq, le Canal Saint-Martin, le Canal Saint-Denis et les lacs des bois de Boulogne et Vincennes, bien supérieurs aux cartes piézométriques de 2010. Cette situation amène à considérer que ces plans d'eau sont moins bien connectés aux aquifères qu'estimé initialement. Pour cela, nous avons donc réduit le coefficient de transfert des mailles affleurant sous les lacs et canaux de  $0,01 \text{ m}^2/\text{s}$  à  $0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$ . L'amélioration a été importante notamment au niveau du Bassin de la Villette où la piézométrie s'abaisse de plus de 15 m.
- Les perméabilités verticales des formations affleurantes. Comme nous avons pu le décrire dans la Partie 1, lorsqu'une formation géologique est affleurante, ou proche de la surface, sa perméabilité verticale augmente du fait de son altération. De ce fait, nous avons modifié ce paramètre pour les couches du Bartonien, des SB\_median et du Lutétien dans certaines zones, comme au niveau de la Butte de Belleville, du Bois de Vincennes, du Bois de Boulogne ou du 14<sup>e</sup> arrondissement.

Tous ces secteurs, qui ont subi des modifications pour améliorer les simulations, sont visibles sur la Figure 3. 14 .



**Figure 3. 14: Carte des zones de calage du modèle.**

### 2.2.3. Résultat de la simulation après calage

Après avoir procédé au calage du modèle, nous avons pu simuler le comportement des nappes parisiennes. Les simulations sont visibles sur la Figure 3. 15, la Figure 3. 16, la Figure 3. 17, la Figure 3. 18, la Figure 3. 19 et la Figure 3. 20.

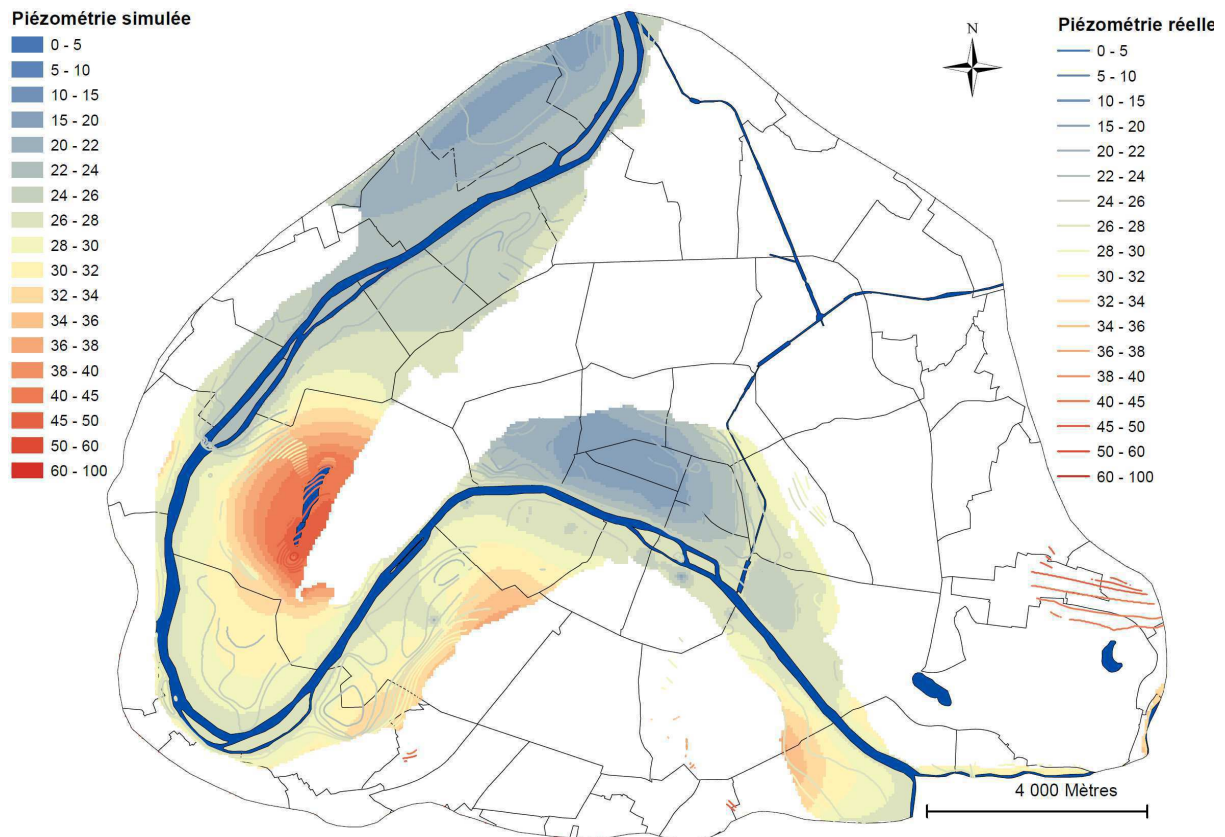


Figure 3. 15: Simulation de la nappe des alluvions anciennes après calage.

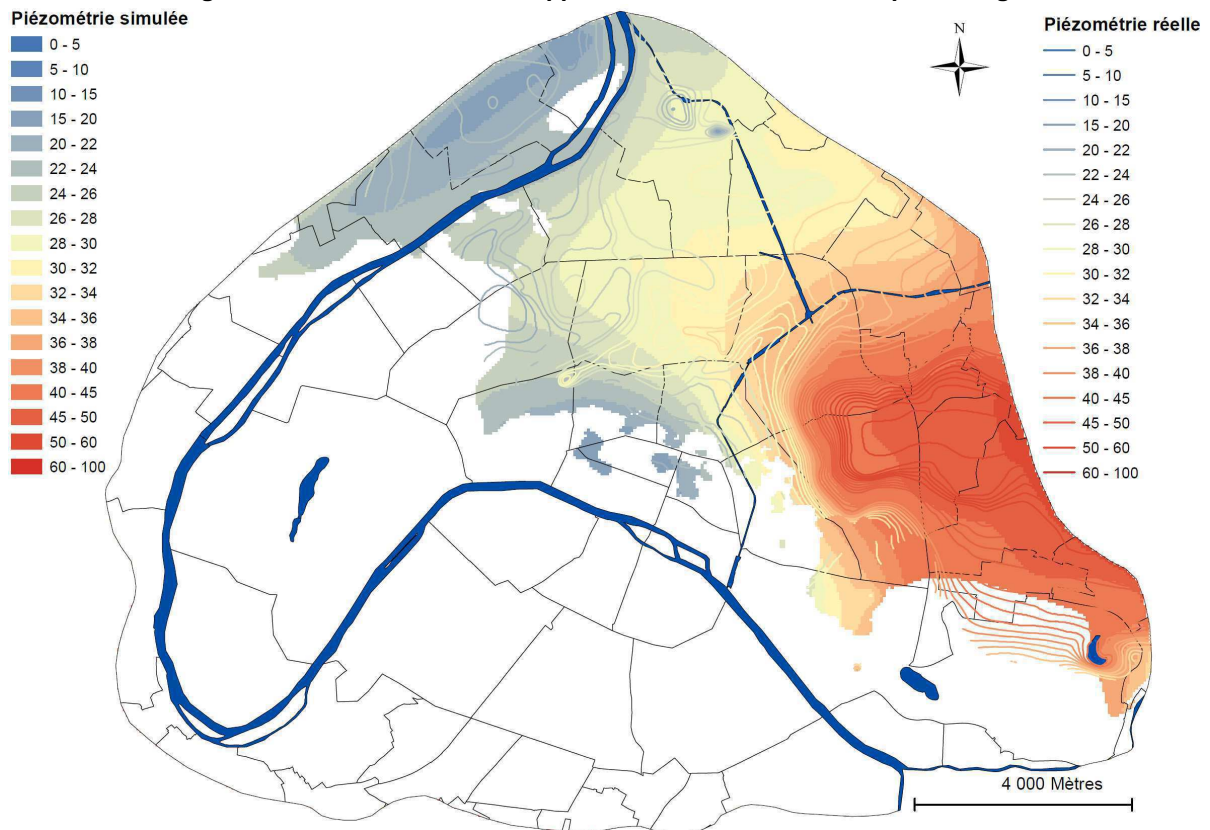


Figure 3. 16: Simulation de la nappe du Bartonien après calage.



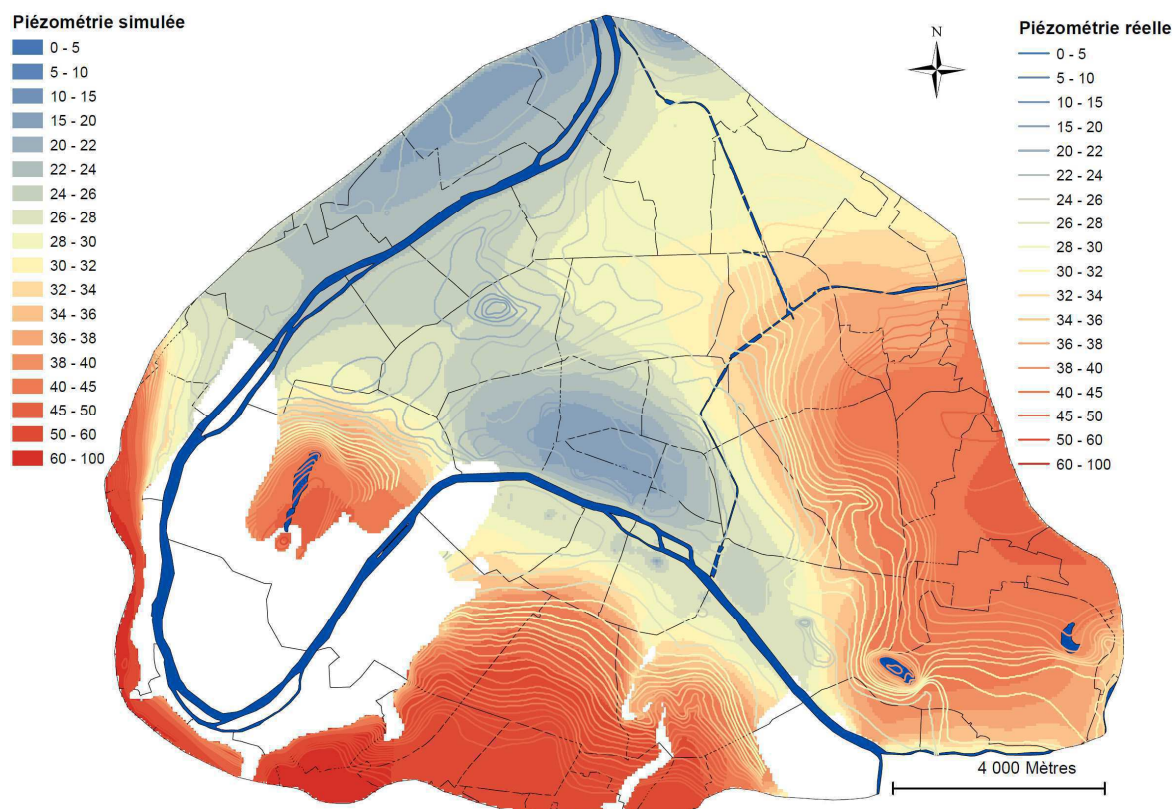


Figure 3. 17: Simulation de la nappe du Lutétien après calage.

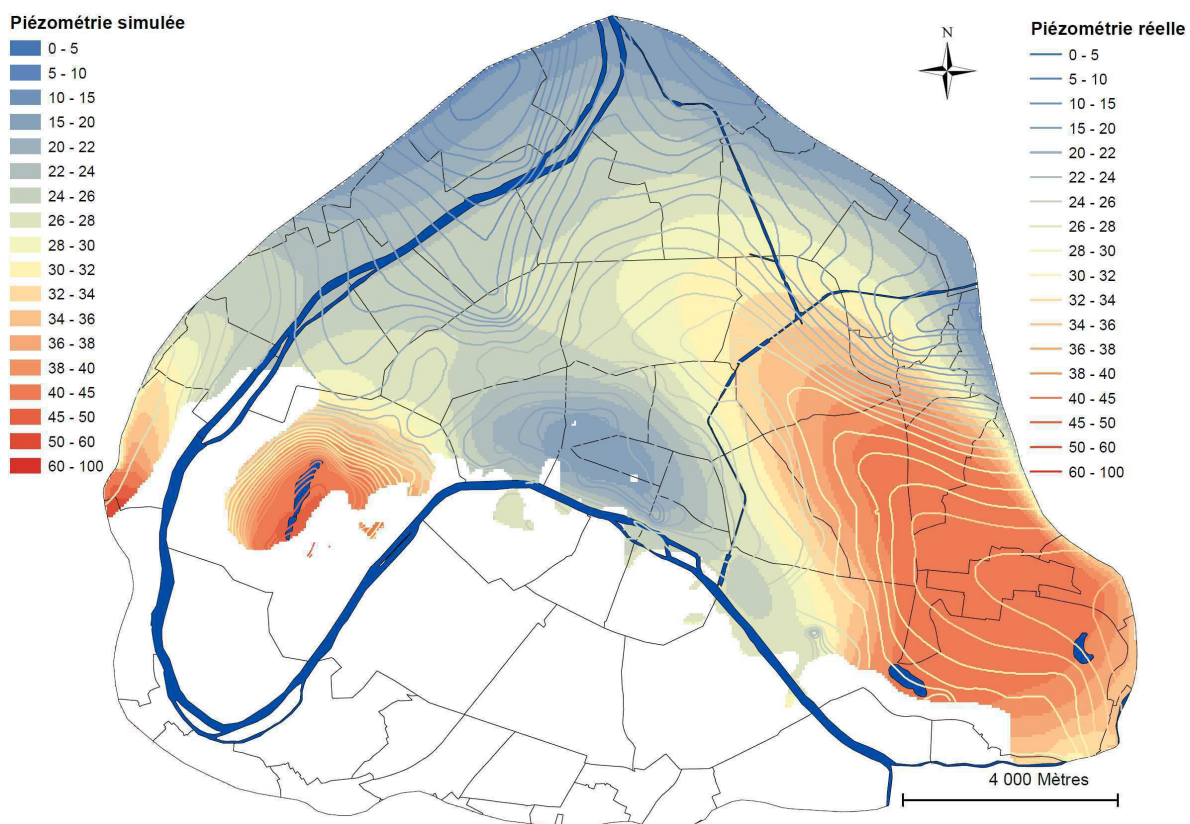


Figure 3. 18: Simulation de la nappe de l'Yprésien supérieur après calage.

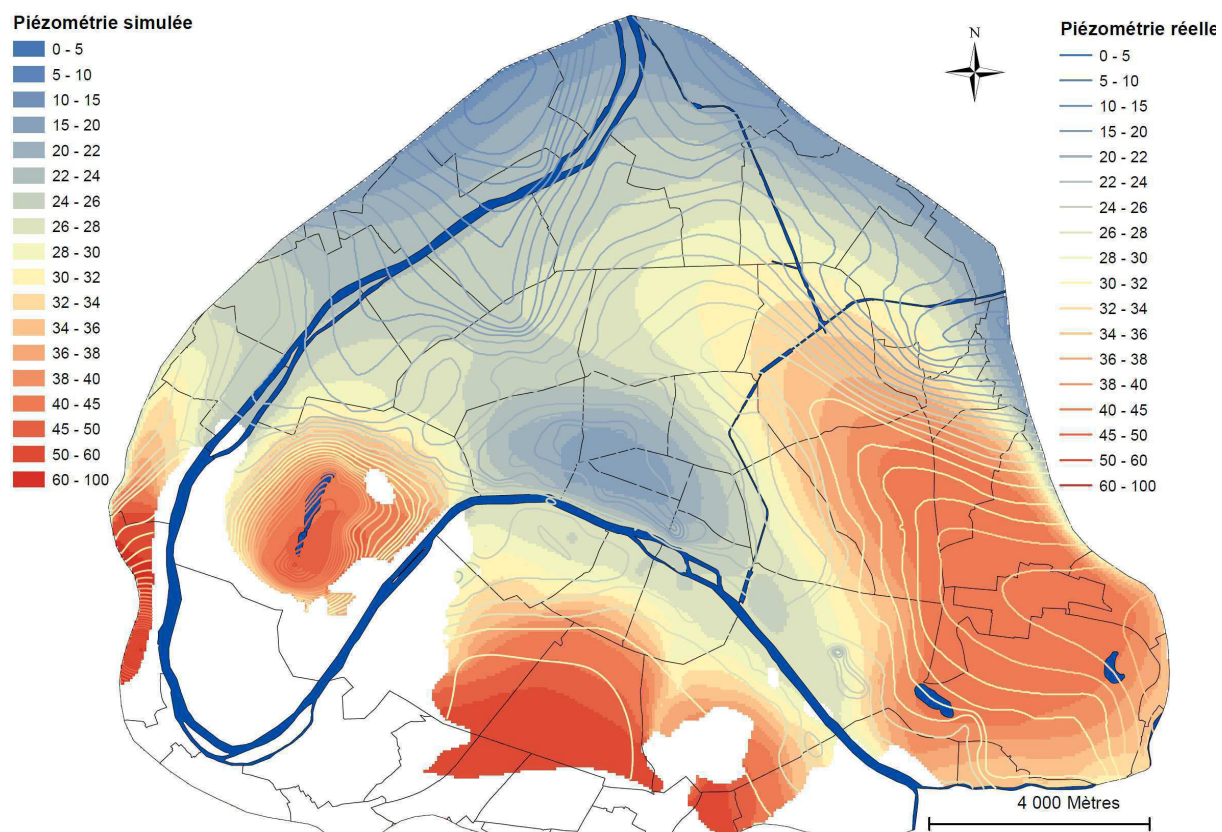


Figure 3. 19: Simulation de la nappe de l'Yprésien inférieur après calage.

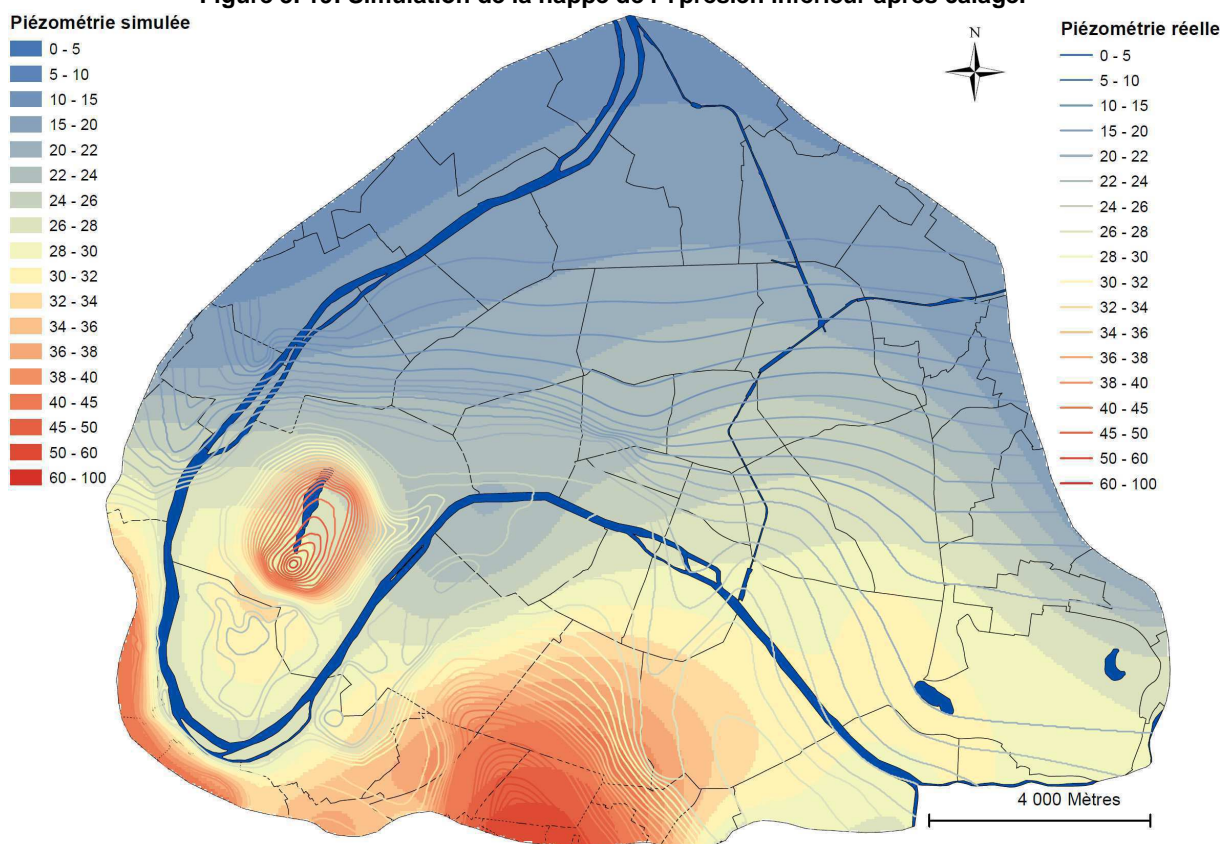


Figure 3. 20: Simulation de la nappe de la craie après calage.



Ces simulations reproduisent convenablement le sens général d'écoulement des nappes et mettent en évidence l'influence des prélèvements d'eau sur la piézométrie. Nous noterons que les zones les plus impactées par des dépressions piézométriques d'origine anthropique sont localisées dans un secteur regroupant 28 % des infrastructures souterraines.

Les différents calages du modèle ont permis la réalisation de cartes piézométriques proches des valeurs mesurées pour les nappes des alluvions anciennes, du Bartonien et du Lutétien. Les simulations pour les nappes de l'Yprésien supérieur, de l'Yprésien inférieur et de la Craie sont moins bonnes car elles surestiment toujours la piézométrie dans certains secteurs, notamment à l'Est et au Sud du modèle.

### **3. Conclusion du calage et perspectives de la modélisation**

La principale conclusion de notre modélisation est de mettre en évidence le rôle des prélèvements d'eau sur le comportement des nappes à Paris et en particulier les conséquences de la méconnaissance des débits réellement prélevés. Des améliorations importantes doivent cependant encore être apportées au modèle notamment pour la représentation des couches profondes avant qu'il soit envisageable de simuler des scénarii d'évolution transitoire de la piézométrie sous l'effet, par exemple, d'une crue de la Seine ou de modifications des prélèvements d'eau.



# Conclusion générale et perspectives

Cette thèse actualise depuis la dernière étude de 1988 (Prunier-Leparmentier), synthétise et améliore les connaissances géologiques, hydrogéologiques et des conséquences anthropiques du sous-sol parisien.

Elle a permis de préciser, sur une zone d'étude de plus de 200 km<sup>2</sup> incluant Paris intra-muros et sa proche banlieue, l'extension géographique et verticale des formations géologiques grâce à plus de 20 000 sondages et de décrire leur complexité à une échelle fine.

Grace aux mesures de 669 piézomètres répartis sur la zone d'étude, la piézométrie des nappes pour l'année de référence 2010 est maintenant correctement connue, ce qui a permis de confirmer les zones présentant des différences piézométriques significatives par rapport au niveau naturel des nappes estimé d'après des cartes piézométriques anciennes.

Le recensement et la cartographie des structures souterraines (plus de 20 000 bâtis et 279 km de voies ferrées) ont permis d'identifier que 28 % de ces infrastructures se trouvent dans des secteurs présentant des dépressions piézométriques caractéristiques et baigneraient dans la nappe phréatique en l'absence de rabattements sous l'effet de pompages..

Ce travail met en évidence la particularité du réseau hydrographique et des réseaux artificiels avec notamment le rôle important des réseaux d'adduction sur la recharge des nappes. Il amène également à conclure que le taux d'aménagement du sol, qui est de 70% à Paris, influe sur les recharges naturelles qui apparaissent deux fois plus importantes lorsqu'elles se font à travers les cours d'immeubles qu'à travers les espaces verts.

Les prélèvements dans les nappes paraissent avoisiner 30 millions de m<sup>3</sup> par an ; ils se révèlent ainsi d'un ordre de grandeur trois fois supérieur à la quantité estimée d'après les déclarations des usagers. Ils ont un fort impact sur la piézométrie des nappes et sont en particulier responsables d'une inversion du sens d'écoulement naturel entraînant une alimentation du système aquifère par la Seine.

Cette thèse a été l'occasion de la création d'un SIG tridimensionnel du sous-sol de la capitale qui intègre la géologie, l'hydrogéologie et les perturbations anthropiques du sous-sol. Ce système d'information apparaît actuellement unique en son genre.

Toutes les informations contenues dans le SIG ont permis de conceptualiser l'hydrosystème parisien et de construire un modèle hydrodynamique composé de 11 couches comportant 607 171 mailles carrées de 50 m de côté. Plusieurs tentatives de calage de ce modèle en régime permanent pour reproduire la piézométrie actuelle des nappes parisiennes ont permis de dégager des pistes d'amélioration de cet outil de simulation. Au stade actuel, le modèle simule correctement le sens d'écoulement général des nappes ainsi que leur comportement face aux prélèvements d'eau, avec

néanmoins des incertitudes sur les niveaux des nappes plus profondes et aux emplacements des dômes piézométriques.

Une exploitation plus poussée de la base de données constituée à l'occasion de cette thèse devrait permettre de rendre le modèle plus réaliste afin de pouvoir simuler des scénarii d'évolution de l'hydrosystème sous l'effet d'événements naturels ou de pressions anthropiques.

# Bibliographie

**AESN**, 2001. Réalisation d'un modèle de gestion des aquifères de l'Albien et du Néocomien du bassin de Paris, rapport du groupe de travail Albien. Rapport technique de l'Agence de l'eau Seine Normandie.

**Albinet M.**, 1967, Carte hydrogéologique du Bassin de Paris, 1/500 000. BRGM.

**Amar S., Josseaume H., Pilot G., Caron B.**, 1970. « Etude des fondations de trois ouvrages du boulevard périphérique de Paris ». Bull. Liaison Labo. Routiers P. et Ch. N° 44 - Mars-Avril 1970 - Réf. 755, p. 39-88.

**André P., Diffre Ph., Gringarten A., Landel P.-A.**, 1977. Utilisation des eaux souterraines pour la climatisation d'un immeuble avenue de l'Opéra – Paris 1<sup>er</sup>. BRGM/77-SGN-354-BDP, 16 p.

**APUR**, 2010. Etude sur le devenir du Réseau d'eau non potable, décembre 2010, 158 p.

**Arnould M., Le Guillou P.**, 1967. Sur les cavités souterraines de dissolution dans les Marnes et Caillasses du Lutétien Supérieur dans la Région Parisienne. CR Acad. Sc. Paris, t265, série D 265, p. 1864-1866.

**Barles S., Benoit P., Berthier K., Billen G., Boët P., Boyer F., Brunstein D., Garnier J., Guillaume A., Lestel L., Meyerbeck M.**, 2002. Analyse rétrospective du fonctionnement du système Seine. Rapport de synthèse du PIREN-Seine 1998-2001. 38 p.

**Belgrand E.**, 1887. Les travaux souterrains de Paris, tome V.

**Berger G.**, 1983. Remontée des nappes – Désordres engendrés en milieu Urbain : agglomération parisienne. BRGM/83-SGN-808-IDF. 19 p.

**Bergeron C., Dehays H., Pointet T.**, 1983. Remontées des nappes d'eau souterraines. BRGM/83-SGN-353-EAU. 56 p.

**Bourrier R.**, 1997. Les réseaux d'assainissement, calculs, applications, perspectives.

**Cailleux J.B., Hirschauer A., Paumier A.**, 1998. Etude hydrogéologique bibliographique de la Plaine Saint-Denis, Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est Parisien.

**Caillol M., Diffre Ph., Lasserre B.**, 1975. Etablissement d'une carte de profondeur des la nappe phréatique dans la banlieue ouest de Paris. BRGM/75-SGN-380-BDP. 13p.



**Cavalier C. et Pomerol C.,** 1979. Chronologie et interprétation des événements tectoniques cénozoïques dans le Bassin de Paris. - Bull. Soc. géol. France, 7, 21, 33-48.

**Chocat B., Thibault S., Seguin D.,** 1982. Hydrologie urbaine et assainissement. Tome 1. Cours polycopié de l'INSA de Lyon, 142 p.

**Colin P.,** 1986, « Evolution des nappes peu profondes à Paris depuis un siècle ». PFE, ENSMP, Paris, juillet 1986, 62 p.

**Delesse M.,** 1862. Carte hydrogéologique du département de la Seine. Paris.

**Diénert F.,** 1948. Hydrologie souterraine du département de la Seine. Union Géodésique et Géophysique internationale. Commission du Bassin de la Seine, cahier n°9, 29 p.

**Diffre P., Marquet G., Richard M.,** 1977. Etude de la température des nappes peu profondes à Paris et dans la banlieue nord. Diffuseur du document BRGM. Rapport BRGM/77-SGN-320-BDP. 35 p.

**Diffre P.,** 1969. Géologie dynamique – Hydrologie de Paris et sa banlieue. Thèse de Doctorat, Paris, 345 p.

**Diffre P.,** 1975. Travaux réalisés sous la nappe phréatique à Paris. BRGM/75-SGN-237-BDP. 48 p.

**Eau de Paris,** 2011. Rapport d'activités 2011. 36 p.

**Filliat G.,** 1981. La pratique des sols et fondations. Éditions du Moniteur, Paris. 1 392 p.

**Fouché O., Hirschauer A.,** 2007. "Evolution piézométrique de la nappe phréatique de Seine-Saint-Denis et zonage d'infiltrabilité." *Nat. Meet. Hydrogéologie en milieu urbain, CFH-AIH, Comité Français d'Hydrogéologie*. Lyon, France. Cd Rom.

**Fouché O.,** 2009. "Impact des eaux souterraines sur le patrimoine bâti." *Nat. Meet. JSE, Journées scientifiques de l'environnement*, 10-12 Fev. 2009. Vol. 20. Créteil, France: Archive HAL. 31p.

**Fruneau B., Deffontaines B., Rudant J.-P., Prunier-Leparmentier A.-M.,** 2003. Interférométrie : application au suivi des subsidences sur Paris, Bulletin de l'Association des Géologues du Bassin de Paris, vol 40, n°4, p.11-18.

**Fruneau B., Deffontaines B., Prunier-Leparmentier A.-M., et Rudant J.-P.,** 2004. Suivi des déplacements verticaux par interférométrie radar: exemple de la gare Haussmann-Saint-Lazare (Paris), *Revue Française de Géotechnique*, vol. 106-107, p.103-110.

**Fruneau B., Deffontaines B., Rudant J.-P., and Prunier-Leparmentier A.-M.,** 2005. Monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris with differential interferometry, *C.R. Géosciences*, 337(13),p. 1173-1183.

**Fruneau B.,** 2011. L'interférométrie radar appliquée au suivi des mouvements de terrain et à l'étude du cycle sismique, Mémoire de Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches, université Paris-Est. 250 p.

**Gély J.-P.,** 2009. Le Lutétien: une période charnière de l'histoire du Bassin Parisien, *Saga Information* – N° 284 – Février 2009, p. 6-24.

**Gromaire-Mertz M.-C.,** 1998. La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire: caractéristiques et origines, Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 507 p. + annexes.

**Guillou A.,** 2003. « Risque inondation par débordement de rivière », dans *Les risques majeurs en Ile-de-France*, les Cahiers de l'IAURIF, n° 138, 3ème trimestre 2003, 63 p.

**HYDRATEC,** 2003. Elaboration d'un PPRI pour le secteur des Halles - TL/FM/AB/19179. 70 p.

**Inspection Générale des Carrières de Paris,** 2003. Notice technique – Travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien, 10 janvier 2003, 13 p.

**Jardin J.,** 1975. Fondations sur le gypse. Expérience acquise en région parisienne. *Bull, liaison Labo. P. et Ch.*, 78. juil.-août 1975, p 53-63.

**Kessler J. et Chambrada.,** 1986. La météo de la France. , *Revue de géographie alpine*, 1986, vol. 74, n° 3, p. 346-347.

**Labatut M., Gabin M.,** 1979. Construction de la gare souterraine de Paris-Nord : La dissolution des gypses et ses conséquences. *Tunnels et ouvrages souterrains*, 33, 1979, p. 172-184.

**L.C.P.C.,** 1969. Le calcaire de Saint-Ouen : essai d'étude régionale de géologie appliquée au génie civil : compte-rendu des journées d'étude des 5 et 6 octobre 1967. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France)*. 124 p.

**Ledoux E.,** 1975. Programme NEWSAM : principe et notice d'emploi. Technical report, CIGENSMP LHM/R75/11.

**Ledoux E., Magalhaes S.,** 2009. Modélisation hydrogéologique de la nappe des Travertins de Brie et des Sables de Fontainebleau sur la butte Montmartre, rapport final. Rapport technique N° R091228ELED, Centre de Géosciences, École des Mines de Paris, Fontainebleau, France.

**Lefebvre D., La Quèrière P., Leboulanger T.,** 1993. Nappe captive et sous-écoulements : le rôle des alluvions en Basse-Seine. In: *Quaternaire* - Volume 4 - Numéro 2-3 - 1993. p. 103-110

**Leroux A., Orsetti S.,** 2000. Les réactions sulfatiques : conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées. Numéro 225- mars-avril 2000. p.41-50.

**Levassor A., et Ledoux E.,** 1996. Programme NEWSAM - notice d'utilisation. Rapport technique, Ecole des Mines de Paris- CIG.

**Les dossiers de la Seine en partage,** édition 2005. Le risque d'inondation en Île-de-France, édition Seine en partage 56 p.

**Mairie de Paris,** Direction de la propreté et de l'eau – Service technique de l'eau et de l'assainissement (2006), Rapport annuel sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement – exercice 2006. 43 p.

**Mairie de Paris,** Le Livre bleu, mars 2012, 69 p.

**Mairie de Paris,** Compte rendue de la réunion de l'observatoire de l'eau du 28 avril 2009. 13p.

**Mairie de Paris,** 2009, Expertise du diagnostic du réseau d'Eau Non Potable décrit dans le Schéma Directeur de l'Eau 2010-2025. 59 p.

**Mariotti A.,** 1979. Cartographie des zones exposées à la dissolution des gypses dans les formations antéludiennes du Nord de Paris, 9<sup>e</sup>, 10<sup>e</sup>, 18<sup>e</sup> arrondissements. Mémoire CGI, ENSM, Paris, 11 p.

**Miserey Y.,** 2009, « Canalisations : de nouveaux outils pour traquer les fuites », Le figaro Paru le 2 février 2009

**Merakeb D.,** 1997. La voute active de la station Pyramides de la ligne Météor. Revue bimestrielle Tunnels n°141 mai/juin 1997 de l'Association Française des travaux en Souterrains (AFTES). p.145-151.

**Mohsen S., Prunier-Leparmentier A.-M., Erlichman H.,** 2003, Etudes de la stabilité de la Butte Montmartre, Après-mines 2003, 5-7 Février 2003, Nancy, 12 p.

**Morelli P.,** 2000. revue CONSTRUCTION MODERNE – OUVRAGES D'ART. Éditeur CIMBETON, article « Eole - Ligne de RER : symphonie technique en sous-sol » 2000 p 26-35.

**Noizet H., Robert S., Mirlou L.,** « Cartographie des crues centennales à Paris (1740, 1910), dans Beck., Franchomme M., Guizard-Duchamp F., Heude J. (éd.), *Zones humides et villes d'hier et d'aujourd'hui : des premières cités aux fronts d'eau contemporains*, *Revue du Nord*, n°26, p.91-104.

**OCDE**, 1989. « Recherches routières, Durabilité des ponts routiers en béton », OCDE Paris. 144 p.

**Payraudeau S.**, 2004. Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens. Thèse, ENGREF Montpellier. 437 p.

**Prunier-Leparmentier A.-M.**, 1988. Les problèmes géologiques et géotechniques de la Ville de Paris. Thèse, Ecole Nat. Des Mines de Paris. 244 p.

**Prunier-Leparmentier A.-M.**, 1991. Evolution de la nappe phréatique depuis un siècle dans Paris et niveaux connus en 1990. *Rev. Franç. Géotech.* N°56, pp 67-75 (juillet 1991).

**Prunier-Leparmentier A.-M., David O., Schönberg M.**, 2007. Dissolution du gypse à Paris: efficacité et carences de la réglementation. XIV<sup>es</sup> journées techniques du Comité français d'hydrogéologie – Lyon 8-10 novembre 2007. 10 p.

**Raoult Y.**, 1999. La nappe de l'Albien dans le Bassin de Paris : de nouvelles idées pour de vieilles eaux. Thèse de doctorat. Paris 6, 197 p.

**Roussel P.**, 1984. Mission de service public « eaux souterraines » - Synthèse des travaux effectués en 1983. BRGM/84-SGN-212, 105 p.

**Roussel P.**, 1976. Etude hydrogéologique des abords du Canal de l'Ourcq entre l'écluse de Sevrans (Seine-Saint-Denis) et le bassin de la Villette à Paris. Rapport BRGM/76-SGN-247-BDP.

**Rozière E.**, 2007. Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle, Thèse de doctorat, Université de Nantes. 250 p.

**SAFEGE**, 2008. Schéma directeur d'alimentation en eau 2010-2025 : étude prospective sur l'évolution des moyens de production et de distribution d'eau à Paris. p.2-5.

**Soyer R.**, 1953. La géologie de Paris. Mem. carte géol. Fr ., 610p., 46 fig., 6 pl.

**Soyer R.**, 1961. Les dissolutions de gypse antéludiens dans le centre de l'Île-de-France et leurs dangers pour les constructions – B.S.G.F., III, p.432.

**Tesson L.**, 1898. Rapport sur l'aqueduc de Belleville. Procès verbal de la Commission Municipale du Vieux Paris, vol.7, 6 octobre 1898, p.12.

**Thierry P., Prunier-Leparmentier A.M., Lembezat C., Vanoudheusden E., Vernoux J.-F.,** 2009. 3D geological modelling at urban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: The Paris example (France), *Engineering Geology*, 105, p. 51–64.

**Toulemont M.,** 1970. Observations géologiques sur les accidents de dissolution du gypse dans la région parisienne. Bull. liaison Labo P&Ch., 49, p. 89-98.

**Toulemont M., Cailleux J.-B.,** 1972. Observations sur l'origine de certains effondrements de terrains au nord-est de Paris, *Bull, liaison Labo. P. et Ch.*, 59, mai-juin 1972, p. 101-112.

**Toulemont M.,** 1986. Les gypses lutétiens du bassin de Paris : sédimentation, karstification et conséquences géotechniques. Thèse, Université Paris-Sud centre d'Orsay. 318 p.

**Usseglio Polatera J.M.,** 1980. Contribution à la cartographie géotechnique de la ville de Paris, étude de la butte de Belleville, Thèse, Université Pierre et Marie Curie et Ecole Nat. Des Mines de Paris. 296 p.

**Vergnaux H.,** Météor à Saint Lazare 1998. Revue bimestrielle Tunnels n°153 mai/juin 1999 de l'Association Française des travaux en Souterrains (AFTES). p.191.

**Vernoux J.F., Maget P., Afzali H., Blanchin R., Donsimoni M., Vairon J.,** 1997. Synthèse hydrogéologique du Crétacé inférieur du Bassin de Paris, rapport BRGM DSGR/IDF R39702, 93 p.

**Vernoux J.-F., Prunier Leparmentier A.-M., Thierry P., Nowak C., Vanoudheusden E.,** 2007 - Impact des eaux souterraines sur les phénomènes de dissolution du gypse, application à la ville de Paris. XIV<sup>e</sup> journées techniques du Comité français d'hydrogéologie – Lyon 8-10 novembre 2007. 8 p.

**Vuillaume Y.,** 1971. Application des méthodes isotopiques et hydrochimiques à l'étude de la nappe de l'Albien du Bassin de Paris. BRGM /71-SGN-304-HYD. 101 p.

**Watelet J.-M.,** 2010. Impact du changement climatique sur la stabilité des ouvrages souterrains. Rapport d'étude INERIS DRS-10-103862-00411A. 102 p.

**Zéglil Z.,** 2011. Etude des nappes sous Paris et sa proche banlieue : Evaluation de l'activité humaine. Rapport de mémoire de Master. Paris : Université Pierre et Marie Curie. 50 p.



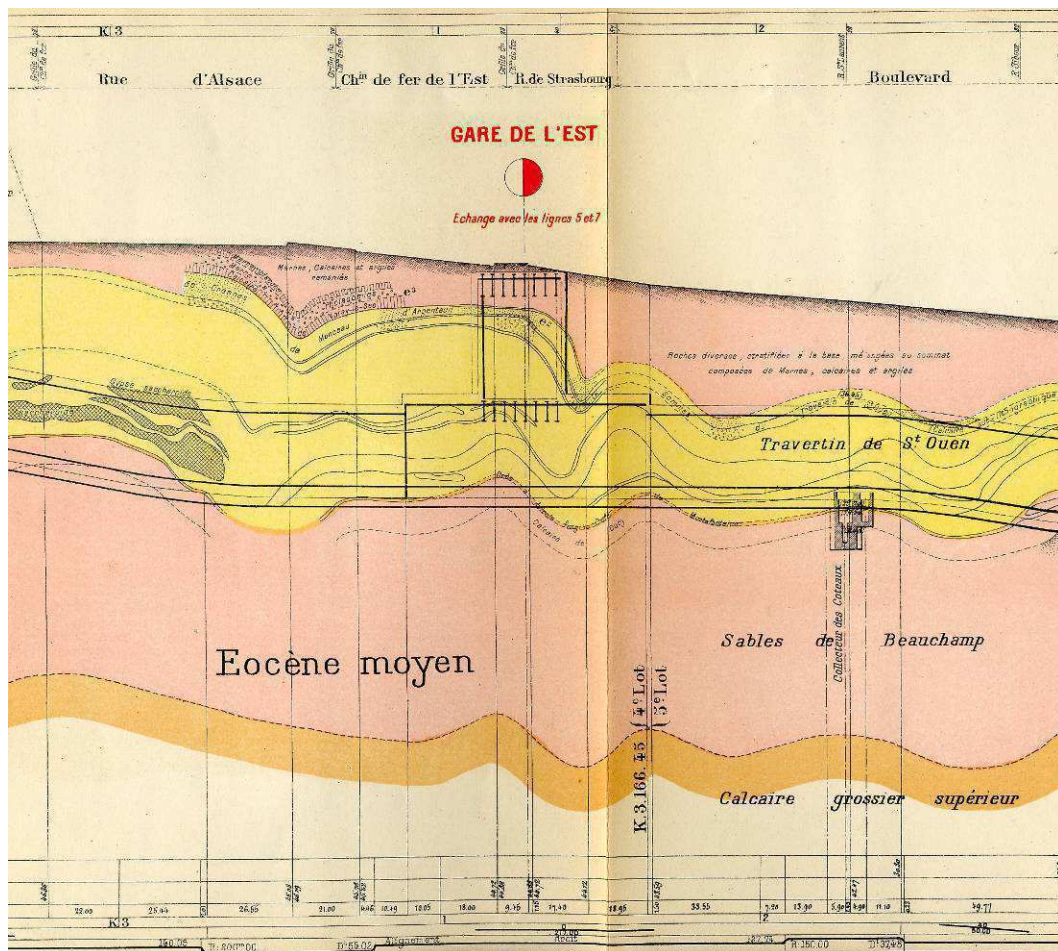
# Liste des annexes

Annexe 1. 1: Coupe géologique de la ligne 4 au niveau de la gare de l'Est (RATP).....	197
Annexe 1. 2: Léger plissement au sommet du Calcaire Grossier .....	197
Annexe 1. 3: Bancs de silex dans la Craie de Meudon.....	198
Annexe 1. 4: Rognon de silex dans la Craie de Meudon .....	198
Annexe 1. 5: Moule externe d'un lamellibranche géant dans une carrière de Craie de Meudon .....	198
Annexe 1. 6: Miroir de faille dans la Craie blanche de Meudon.....	198
Annexe 1. 7: Marnes de Meudon .....	199
Annexe 1. 8: Contact entre les Marnes et la Craie de Meudon dans un début de fontis.....	199
Annexe 1. 9: Sables Supérieurs.....	199
Annexe 1. 10: Argile de Laon (Paris 10 <sup>e</sup> ) .....	199
Annexe 1. 11: Coupe des carrières souterraines à deux niveaux sous Paris (C. Lorenz) .....	200
Annexe 1. 12: Calcaire Grossier inférieur avec des gastéropodes (Cérithes) et des bivalves (Cardiidae) .....	200
Annexe 1. 13: Calcaire à cérithes (Grignard) .....	200
Annexe 1. 14: Fragment de bois flotté dans le Calcaire Grossier Supérieur (Paris 12 <sup>e</sup> ) .....	201
Annexe 1. 15: Contact du Calcaire Grossier et des Marnes et Caillasses au niveau du ciel de la carrière.....	201
Annexe 1. 16: répartition des faciès dans les le Marno-calcaire de St Ouen (Usséglio Polatera, 1980).....	201
Annexe 1. 17: Stratotypes des Marnes et Caillasses en rive droite à Paris (Prunier-Leparmentier, 1988).....	202
Annexe 1. 18: Détail de gypse à texture saccharoïde.....	203
Annexe 1. 19: 3 <sup>e</sup> masse du gypse avec un banc de gypse pieds d'alouette. ....	203
Annexe 1. 20: Gypse de la 1 <sup>e</sup> masse .....	203
Annexe 1. 21: Marnes à fers de lance.....	203
Annexe 1. 22: Gypse en fers de lance .....	203
Annexe 1. 23: Sables de Fontainebleau .....	203

Annexe 1. 24: Cartographie des éboulis parisiens (source IGC) .....	204
Annexe 1. 25: Cartographie des remblais parisiens (source IGC).....	204
Annexe 1. 26: Localisation de la coupe du 13e arrondissement parisien.....	204
Annexe 1. 27: Localisation des 647 essais de perméabilités utilisés .....	205
Annexe 1. 28: Bras Marie au niveau du Pont Marie asséché durant l'été 1942 (source: EPTB) .....	206
Annexe 1. 29: Nettoyage d'une écluse du Canal Saint Martin (photographie de Jean-Louis Bernasconi).....	206
Annexe 1. 30: Écluse 6 des Récollets (Canal Saint-Martin) .....	206
Annexe 1. 31: Bièvre entre la rue Mouffetard et la rue du Pont-aux-Biches en 1865 (auteur: Charles Marville - Bibliothèque administrative de la Ville de Paris) .....	206
Annexe 1. 32: Collecteur de Bièvre (photo : Hugo Clément) .....	207
Annexe 1. 33: Collecteur Sébastopol (photo: Section de l'Assainissement Parisien) .....	207
Annexe 1. 34: Réseau du tube pneumatique parisien .....	208
Annexe 1. 35: Alimentation de Paris en eau potable (source: eau de Paris).....	208
Annexe 1. 36: Réservoir Montsouris (Mairie de Paris - François Grunberg) .....	209
Annexe 1. 37: Réservoir des Lilas.....	209
Annexe 1. 38: Hauteurs moyennes annuelles de précipitations en cm à Paris (J.Kessler et A.Chambraud 1986) .....	209
Annexe 1. 39: Pluie efficace à Paris entre 1990 et 2010 .....	210
Annexe 1. 40: Classification des surfaces vis-à-vis des pertes et du ruissellement (Chocat et al. 1982).....	210
Annexe 1. 41: Article du 21 janvier 2004 extrait du quotidien « Le Parisien » intitulé « Les voies sur berge fermées pour cause de crue ». ....	211
Annexe 1. 42 : Fuite du réseau de Chauffage urbain (photo IGC). ....	211
Annexe 1. 43: Vide résultant d'une fuite du réseau de chauffage urbain (photo IGC).....	211
Annexe 1. 44: Pluviométrie au parc Montsouris entre 1875 et 2000 (source: Météo France).....	211
Annexe 1. 45: Carrière de Calcaire Grossier à Paris. ....	212
Annexe 1. 46: Carrière de Gypse en Seine-Saint-Denis (photo IGC).....	212
Annexe 1. 47: Débâcle de la Seine du 3 janvier 1910 au Pont Saint-Michel (photographie de Henry Godefroy). ....	212

# Annexes



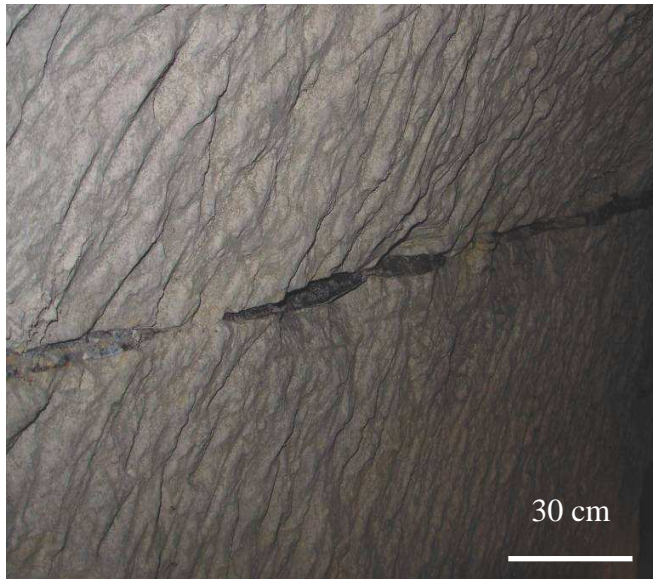


Annexe 1. 1: Coupe géologique de la ligne 4 au niveau de la gare de l'Est (RATP)



Annexe 1. 2: Léger plissement au sommet du Calcaire Grossier





**Annexe 1. 3: Bancs de silex dans la Craie de Meudon**



**Annexe 1. 4: Rognon de silex dans la Craie de Meudon**



**Annexe 1. 5: Moule externe d'un lamellibranche géant dans une carrière de Craie de Meudon**

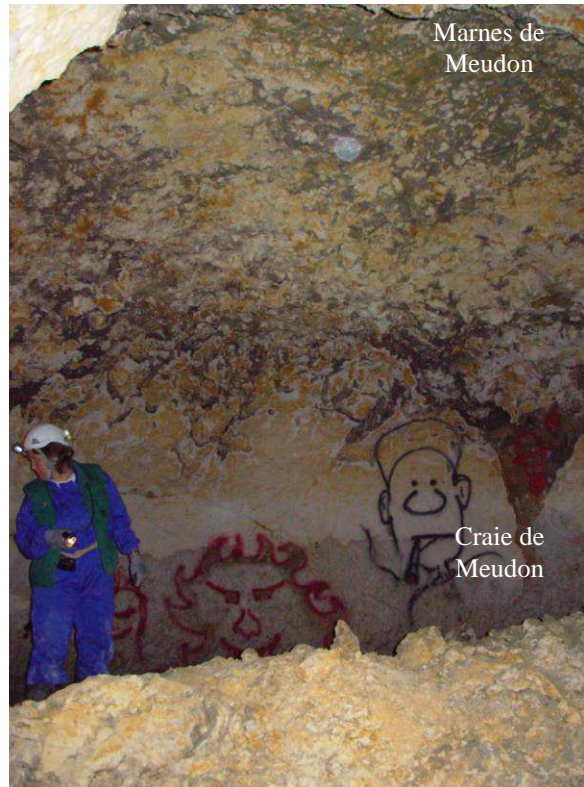


**Annexe 1. 6: Miroir de faille dans la Craie blanche de Meudon**





**Annexe 1. 7: Marnes de Meudon**



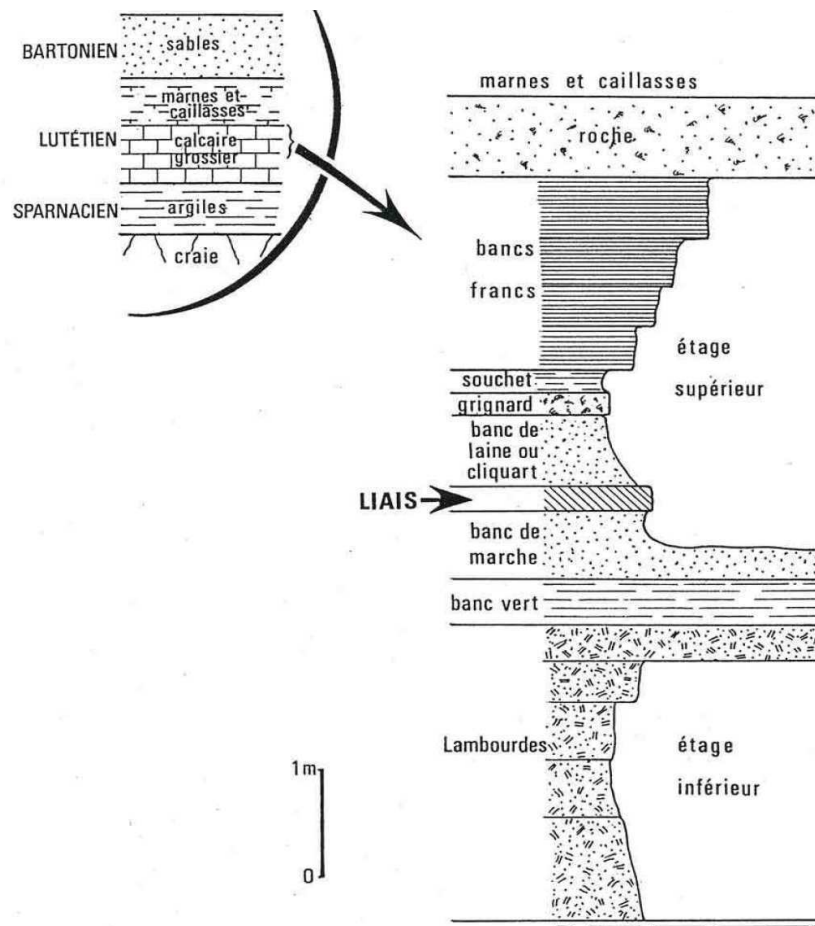
**Annexe 1. 8: Contact entre les Marnes et la Craie de Meudon dans un début de fontis**



**Annexe 1. 9: Sables Supérieurs**



**Annexe 1. 10: Argile de Laon (Paris 10°)**



Annexe 1. 11: Coupe des carrières souterraines à deux niveaux sous Paris (C. Lorenz)

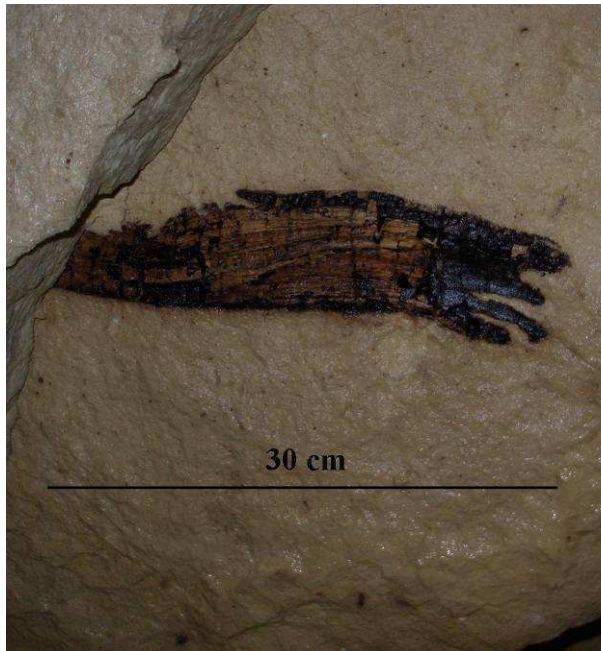


Annexe 1. 12: Calcaire Grossier inférieur avec des gastéropodes (Cérithes) et des bivalves (Cardiidae)



Annexe 1. 13: Calcaire à cérithes (Grignard)

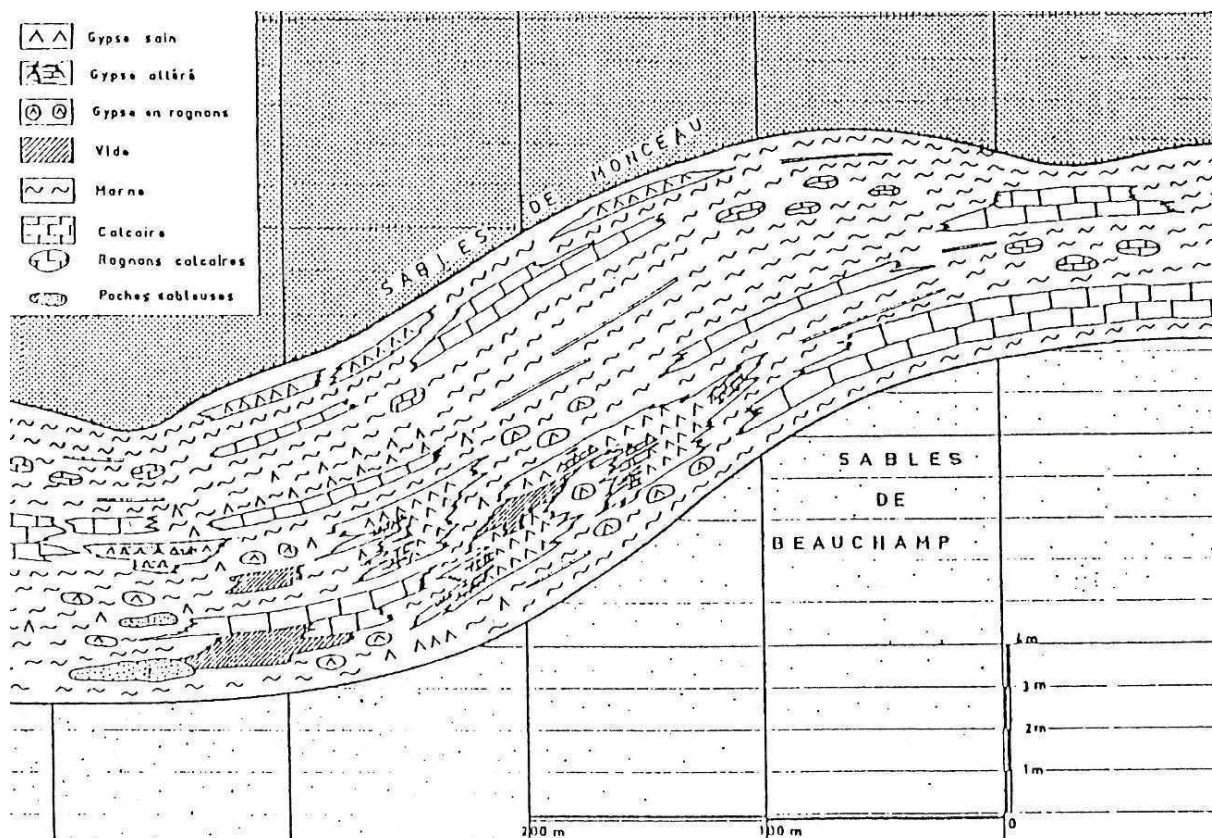




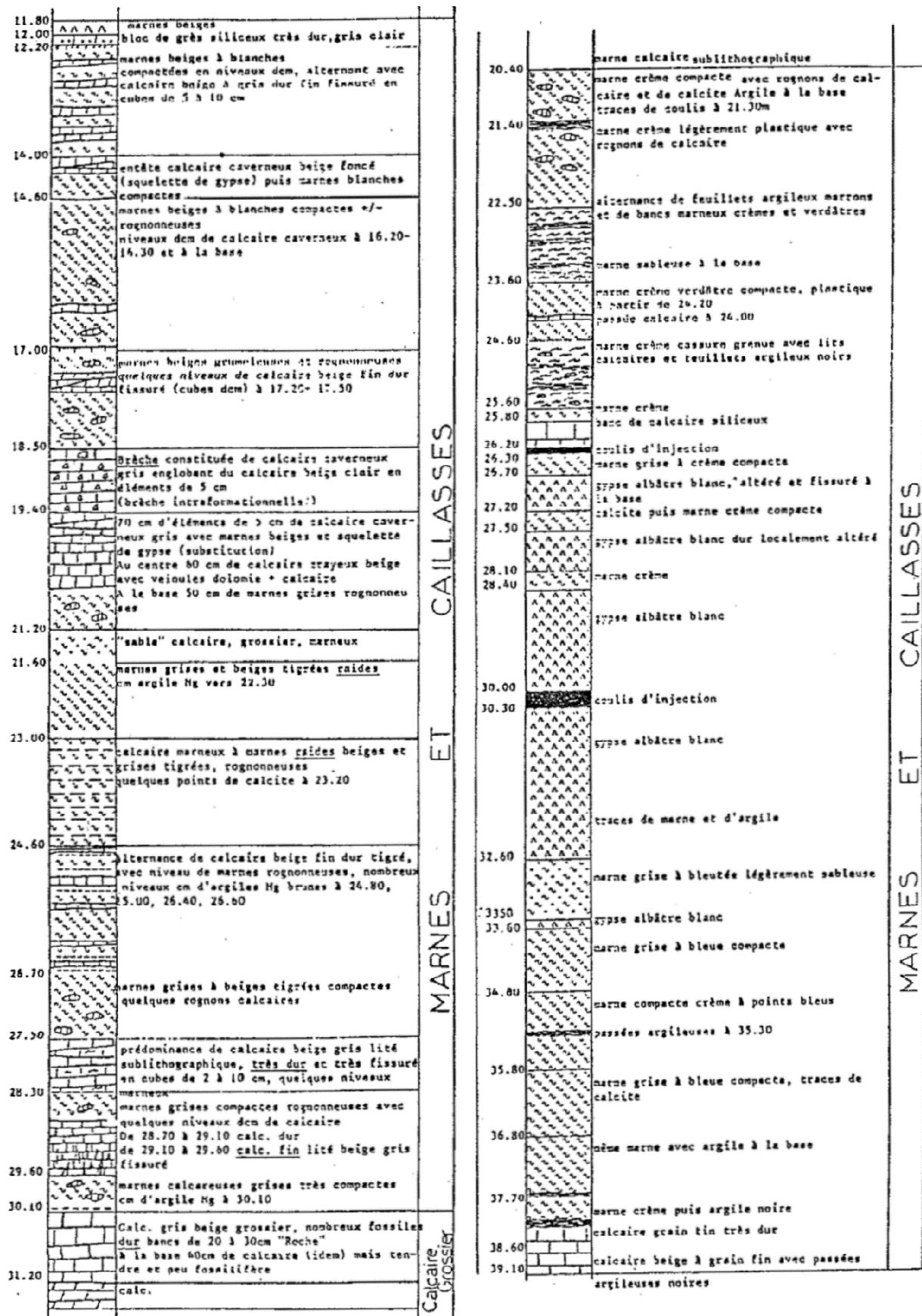
Annexe 1. 14: Fragment de bois flotté dans le Calcaire Grossier Supérieur (Paris 12<sup>e</sup>)



Annexe 1. 15: Contact du Calcaire Grossier et des Marnes et Caillasses au niveau du ciel de la carrière



Annexe 1. 16: répartition des faciès dans les le Marno-calcaire de St Ouen (Usséglio Polatera, 1980)

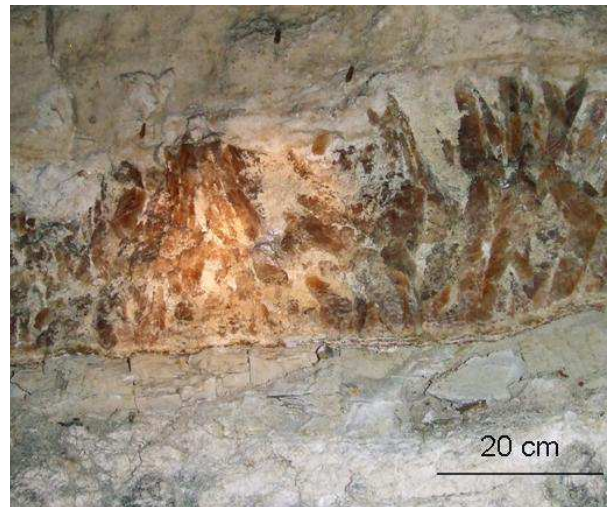


Annexe 1. 17: Stratotypes des Marnes et Caillasses en rive droite à Paris (Prunier-Leparmentier, 1988).





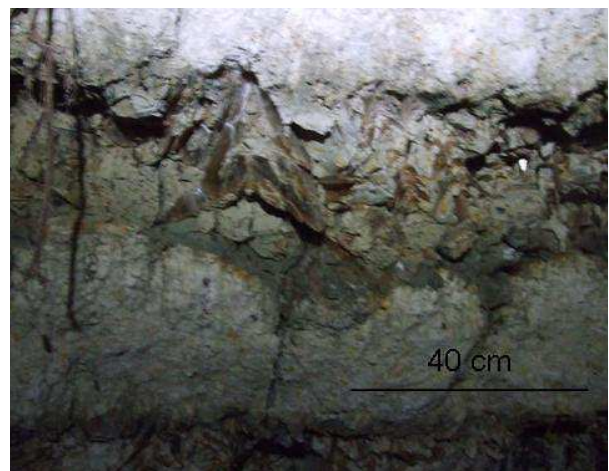
**Annexe 1. 18: Détail de gypse à texture saccharoïde**



**Annexe 1. 19: 3<sup>e</sup> masse du gypse avec un banc de gypse pieds d'alouette.**



**Annexe 1. 20: Gypse de la 1<sup>e</sup> masse**



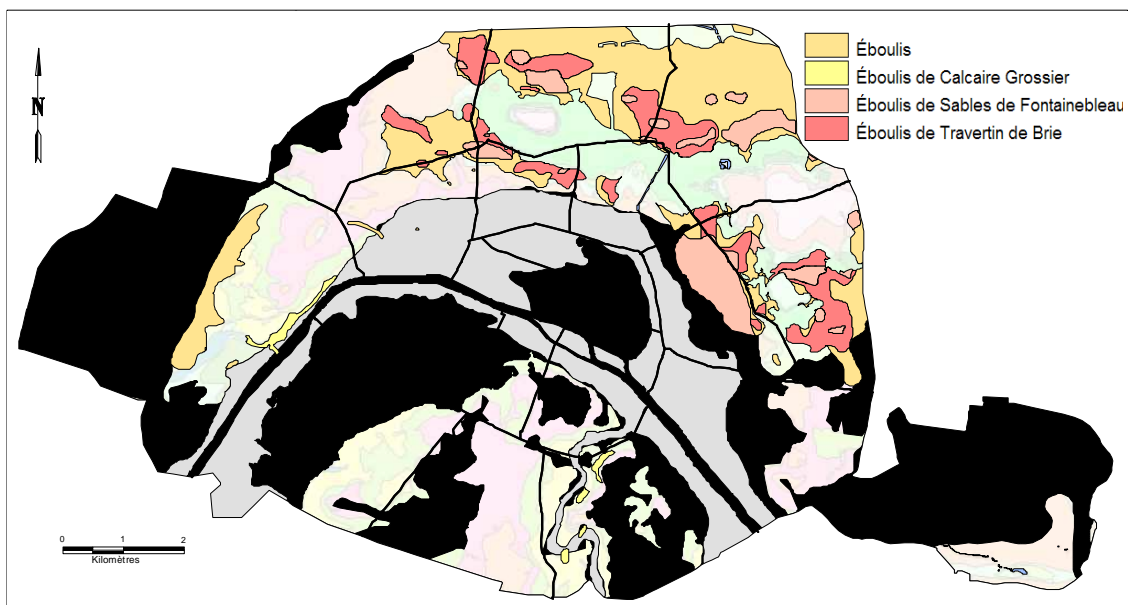
**Annexe 1. 21: Marnes à fers de lance**



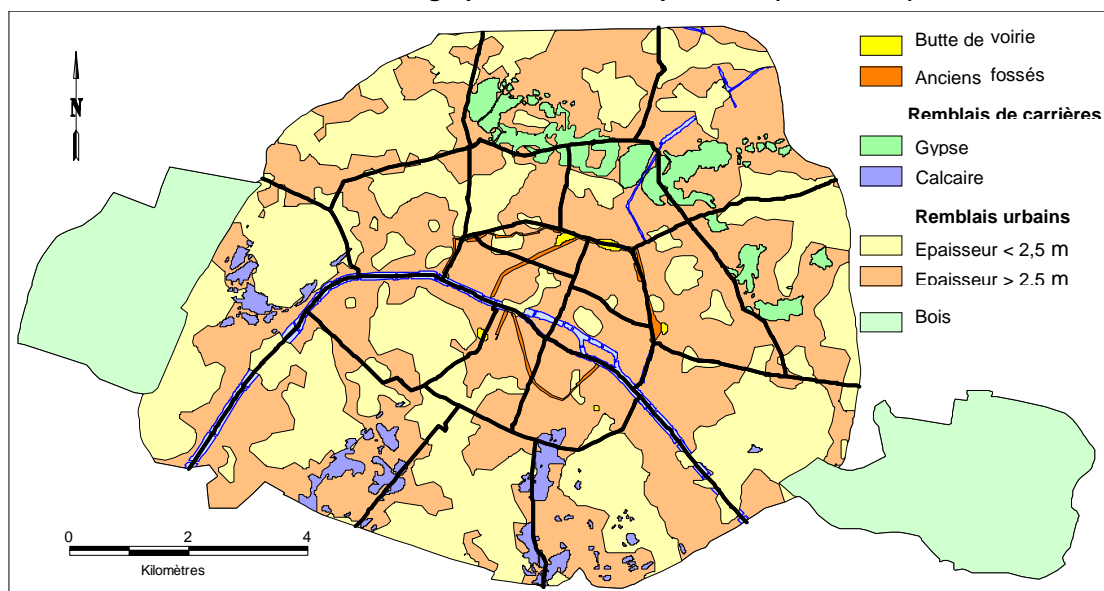
**Annexe 1. 22: Gypse en fers de lance**



**Annexe 1. 23: Sables de Fontainebleau**



Annexe 1. 24: Cartographie des éboulis parisiens (source IGC)



Annexe 1. 25: Cartographie des remblais parisiens (source IGC)



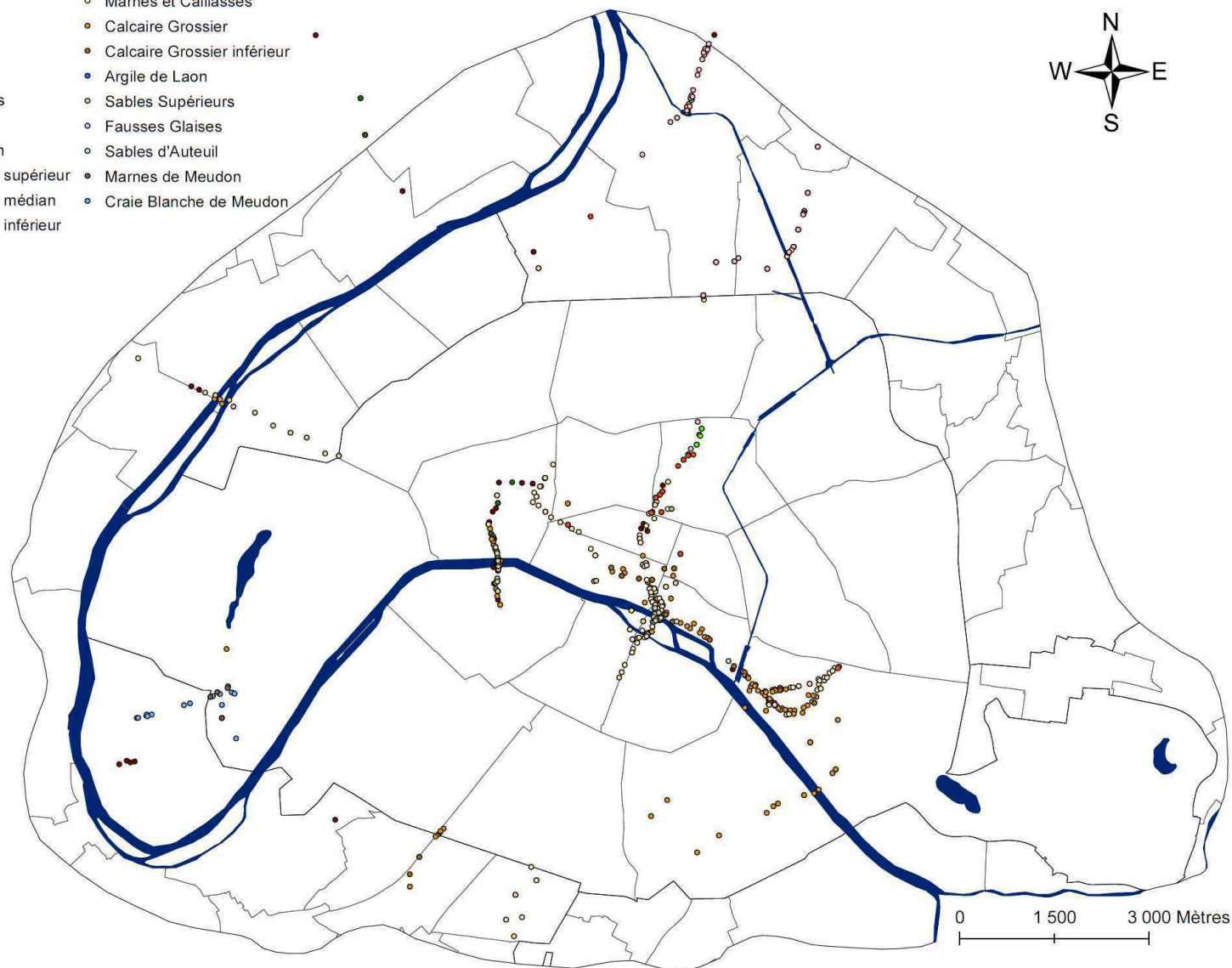
Annexe 1. 26: Localisation de la coupe du 13e arrondissement parisien



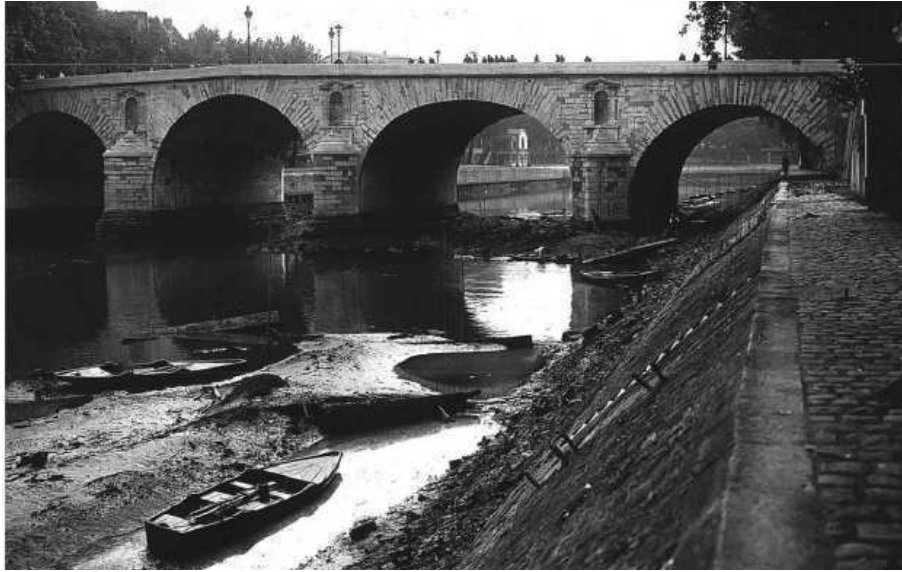
**Essais de perméabilité**

- Alluvions modernes
- Alluvions anciennes
- Travertin de Brie
- Marnes Infragypseuses
- Sables Verts
- Calcaire de Saint-Ouen
- Sables de Beauchamp supérieur
- Sables de Beauchamp médian
- Sables de Beauchamp inférieur

- Marnes et Caillasses
- Calcaire Grossier
- Calcaire Grossier inférieur
- Argile de Laon
- Sables Supérieurs
- Fausses Glaïses
- Sables d'Auteuil
- Marnes de Meudon
- Craie Blanche de Meudon



**Annexe 1. 27: Localisation des 647 essais de perméabilités utilisés**



**Annexe 1. 28: Bras Marie au niveau du Pont Marie asséché durant l'été 1942 (source: EPTB)**



**Annexe 1. 29: Nettoyage d'une écluse du Canal Saint Martin (photographie de Jean-Louis Bernasconi)**



**Annexe 1. 30: Écluse 6 des Récollets (Canal Saint-Martin)**



**Annexe 1. 31: Bièvre entre la rue Mouffetard et la rue du Pont-aux-Biches en 1865 (auteur: Charles Marville - Bibliothèque administrative de la Ville de Paris)**



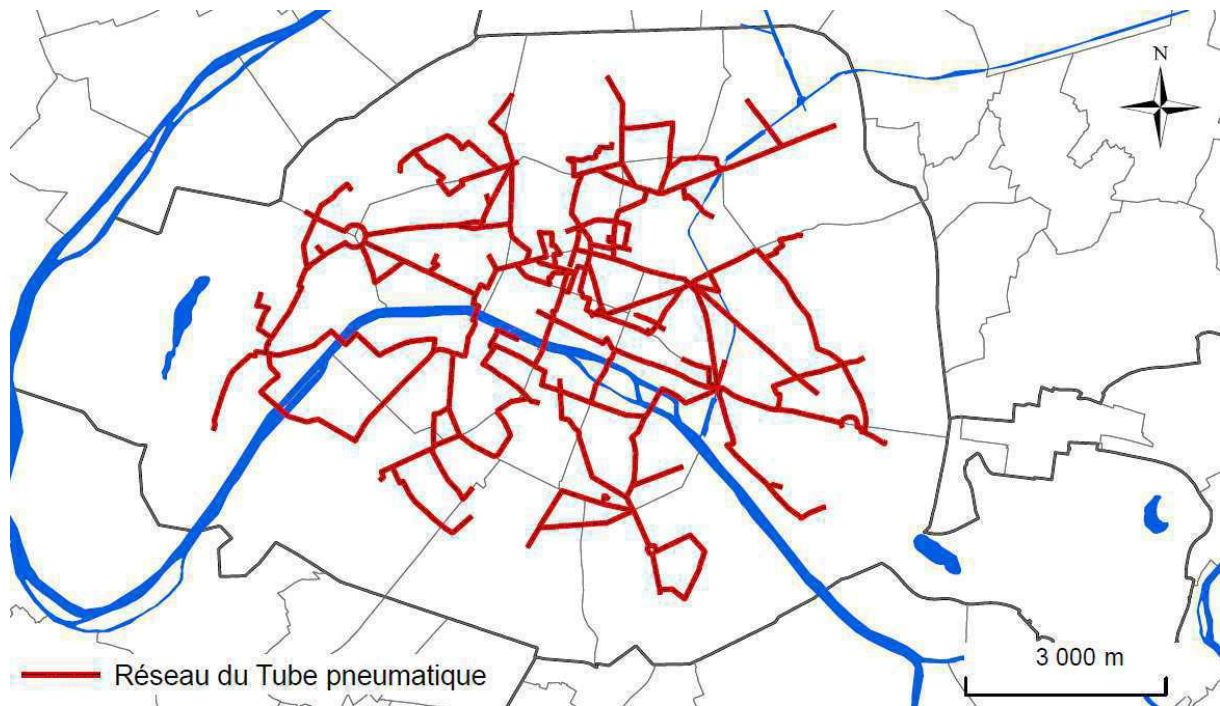


**Annexe 1. 32: Collecteur de Bièvre (photo : Hugo Clément)**

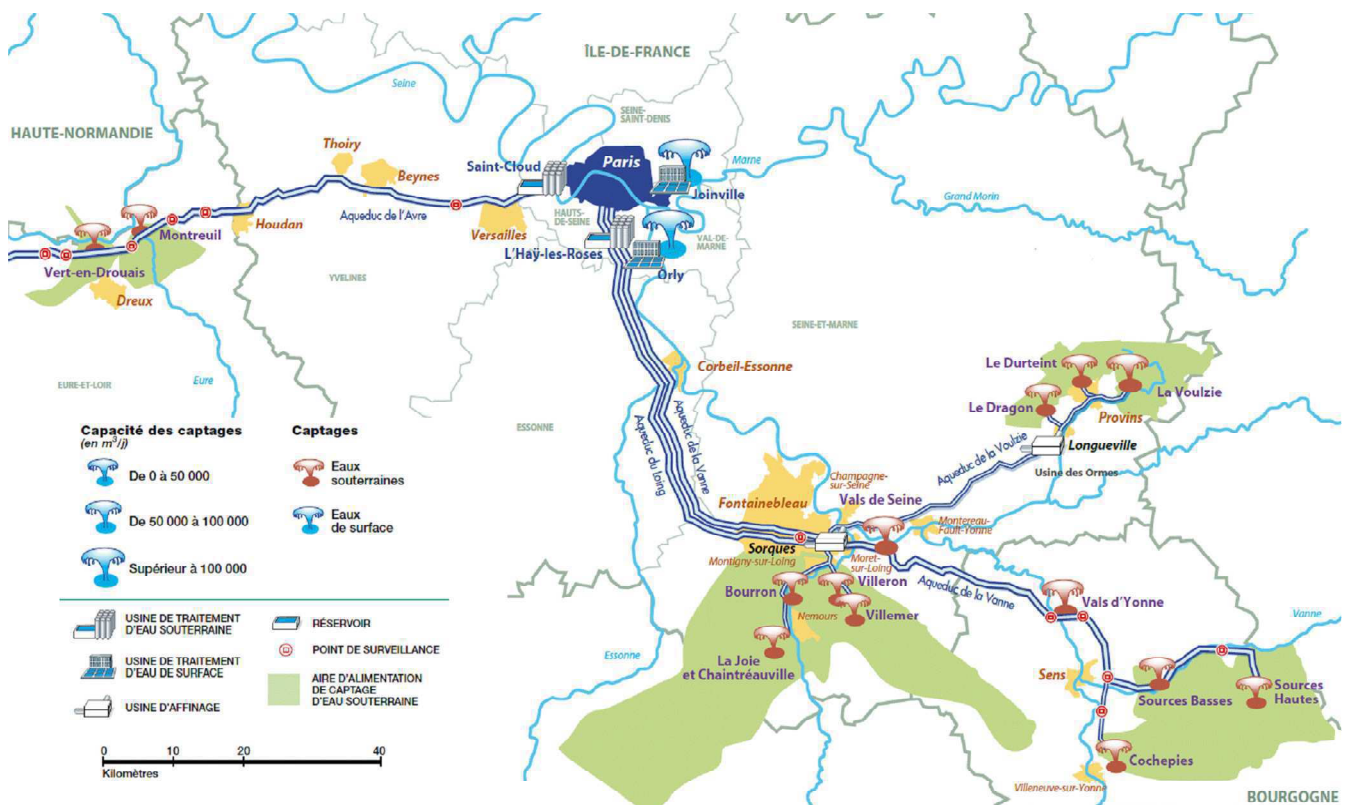


**Annexe 1. 33: Collecteur Sébastopol (photo: Section de l'Assainissement Parisien)**





Annexe 1. 34: Réseau du tube pneumatique parisien



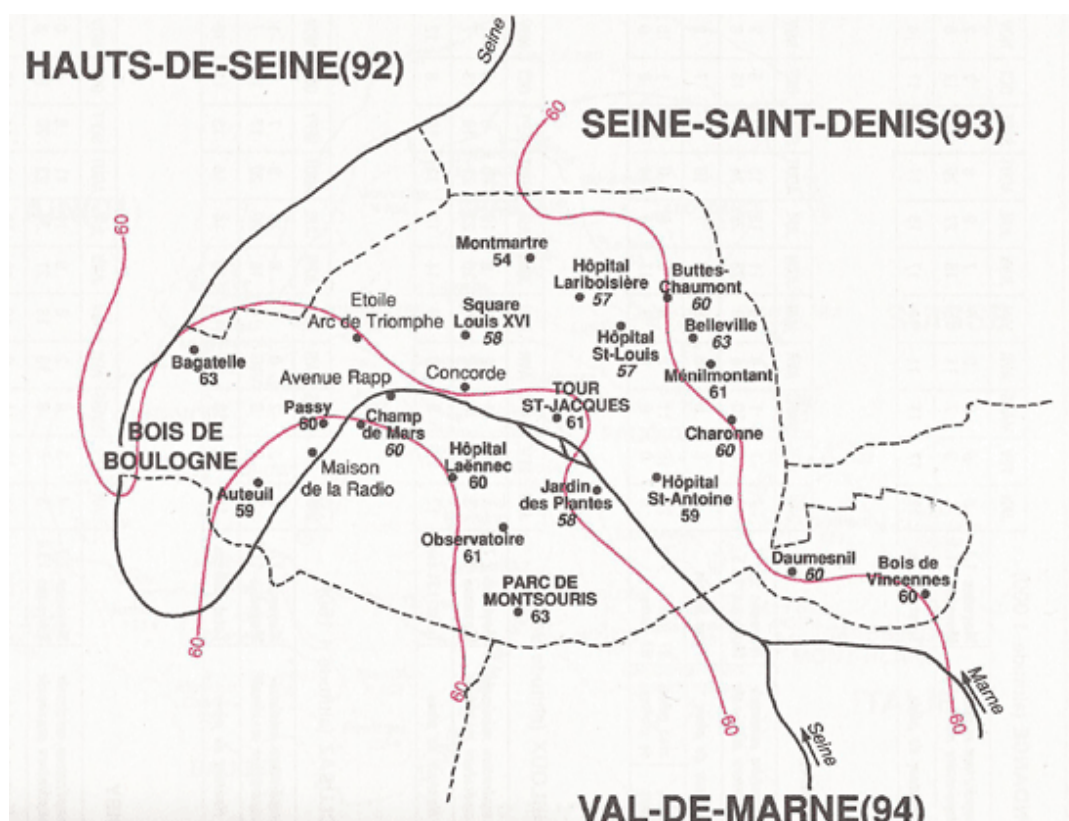
Annexe 1. 35: Alimentation de Paris en eau potable (source: eau de Paris)



Annexe 1. 36: Réservoir Montsouris (Mairie de Paris - François Grunberg)



Annexe 1. 37: Réservoir des Lilas



Annexe 1. 38: Hauteurs moyennes annuelles de précipitations en cm à Paris (J.Kessler et A.Chambrud 1986)

Année hydrologique (septembre à août)	Pluie efficace annuelle (mm)
1990/1991	108,2
1991/1992	55,2
1992/1993	213,1
1993/1994	189,4
1994/1995	185,3
1995/1996	26,7
1996/1997	77,6
1997/1998	151,5
1998/1999	137,2
1999/2000	132
2000/2001	320,2
2001/2002	87,9
2002/2003	165,2
2003/2004	121
2004/2005	50,6
2005/2006	57,8
2006/2007	97,5
2007/2008	102,5
2008/2009	79,4
2009/2010	112,1
Moyenne (mm)	123,52

**Annexe 1. 39: Pluie efficace à Paris entre 1990 et 2010**

Type de surface	Pertes	Écoulement vers le réseau	Influence sur le débit dans le réseau
surface imperméable en liaison directe avec le réseau (voiries, toits d'immeubles, parkings drainés, ...)	très faibles. Évaporation et rétention en surface	très rapide, les avaloirs étant en général assez rapprochés	prépondérante
autres surfaces imperméables (cours d'immeubles, rues ou parkings non drainés, allées de villas, ...)	importantes en particulier ruissellement vers des surfaces perméables. Très difficiles à évaluer	retardé, trajet en surface important	difficile à évaluer, généralement assez faible
surfaces perméables en liaison directe avec le réseau (en particulier bordure de routes ou d'autoroutes, terrains en terre battue, ...)	importantes (infiltration). Dépendent de la pente	légèrement retardé (rôle important de la couverture végétale)	en général faible, mais peut devenir importante en zone péri-urbaine ou en cas d'averse très violente
autres surfaces perméables (jardins, pelouses de villas séparés de la voirie par des murettes, parcs, terrains cultivés, ...)	très importantes (rétention et infiltration)	très retardé	nulle ou négligeable dans (presque) tous les cas

**Annexe 1. 40: Classification des surfaces vis-à-vis des pertes et du ruissellement (Chocat et al. 1982)**

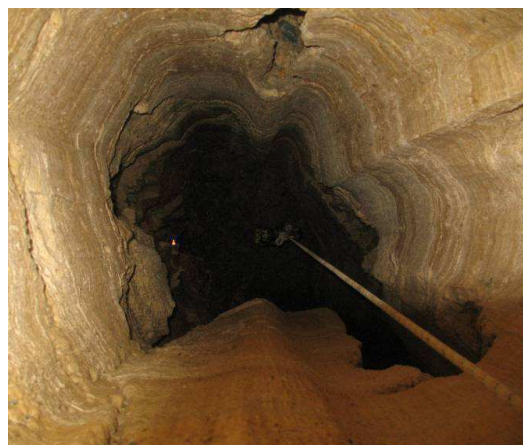


« La cote d'alerte (3,20 m) a été franchie hier par la Seine, comme prévu. Le niveau relevé à 7 heures à l'échelle d'Austerlitz était de 3,17 m, contre 3,06 m la veille à la même heure. Et les eaux du fleuve ont continué de monter dans la journée, passant la cote des 3,20 m vers 11 heures. Conséquence immédiate : la voie d'évitement Valhubert (13<sup>e</sup>) a été fermée dans la matinée, suivie par la voie express rive gauche entre le pont Royal et le quai Branly (VII<sup>e</sup>). La circulation a été difficile dans le secteur toute la journée. Pas de risque pour autant d'une crue majeure pour l'instant. La tendance pourrait rester encore à la hausse toute la journée. Mais une stabilisation des eaux est prévue pour les jours suivants. Les automobilistes sont donc invités à éviter le secteur, au moins aujourd'hui. »

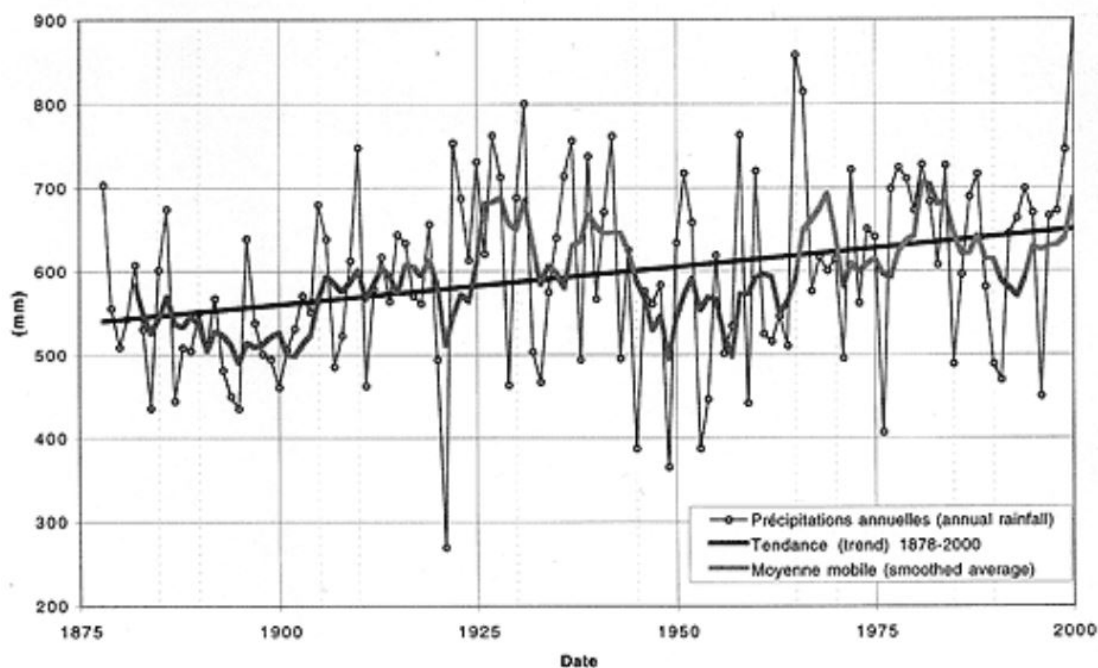
**Annexe 1. 41: Article du 21 janvier 2004 extrait du quotidien « Le Parisien » intitulé « Les voies sur berge fermées pour cause de crue ».**



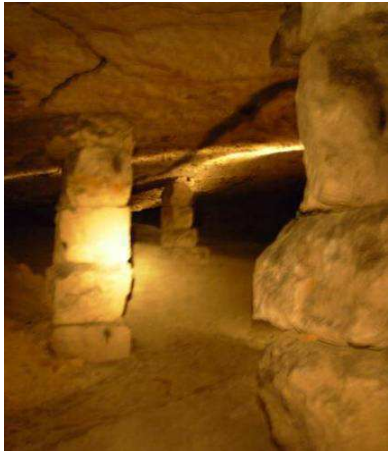
**Annexe 1. 42 : Fuite du réseau de Chauffage urbain (photo IGC).**



**Annexe 1. 43: Vide résultant d'une fuite du réseau de chauffage urbain (photo IGC).**



**Annexe 1. 44: Pluviométrie au parc Montsouris entre 1875 et 2000 (source: Météo France).**



**Annexe 1. 45: Carrière de Calcaire Grossier à Paris.**



**Annexe 1. 46: Carrière de Gypse en Seine-Saint-Denis (photo IGC)**



**Annexe 1. 47: Débâcle de la Seine du 3 janvier 1910 au Pont Saint-Michel (photographie de Henry Godefroy).**





# Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains

**Résumé :** Comme bien d'autres grandes métropoles construites sur des formations géologiques aquifères, Paris présente une situation hydrogéologique complexe et perturbée.

L'imperméabilisation du sol modifie notablement la recharge naturelle des nappes qui se fait alors, principalement, par les fuites des réseaux (voirie, eau non potable, eaux usées ...). L'urbanisation intense du sous-sol, qui représente 22 % de la surface parisienne (hors bois de Vincennes et Boulogne), influence les écoulements des aquifères. A cela, s'ajoute le rôle des 20 à 30 millions de mètres cubes d'eau qui sont prélevés annuellement dans les nappes phréatiques.

Les aquifères parisiens sont surveillés par l'Inspection Générale des Carrières de Paris (Ville de Paris) grâce à un réseau de 305 piézomètres en 2010, qui suit en particulier les ouvrages à proximité de la Seine pour anticiper les conséquences d'une crue. La réalisation d'un modèle hydrogéologique du sous-sol parisien permettant d'évaluer les effets de tels événements et tenant compte des spécificités de l'anthropisation présentait donc un intérêt.

Dans cet objectif, un SIG en trois dimensions du sous-sol parisien a, en premier lieu, été construit. Il intègre plusieurs éléments :

- La géologie parisienne depuis la craie campanienne jusqu'aux formations tertiaires. 17 772 sondages ont été exploités pour cela.
- Les infrastructures souterraines : 20 000 parkings résidentiels et constructions en sous-sol, plus de 140 parcs de stationnement concédés par la ville de Paris, 197 km de galeries du métro souterrain et 46 km du Réseau Express Régional.
- Les prélèvements d'eau, en se basant sur les prélèvements annuels déclarés (12 millions de mètres cubes).
- Les données piézométriques issues de 669 piézomètres répartis sur Paris et des communes avoisinantes.

Avant ce travail, il n'existait aucune représentation synthétique de l'organisation générale du sous-sol de la capitale et de ses aménagements.

Un modèle mathématique hydrodynamique s'étendant sur l'emprise de la capitale et de la proche banlieue a ensuite été construit. Ce modèle multicouche comporte 11 couches alternant 6 niveaux aquifères et 5 niveaux semi perméables, discrétisées selon 607 171 mailles carrées de 50 mètres de côté. Au stade actuel, ce modèle a permis la réalisation de simulations exploratoires reproduisant en régime permanent la structure de l'écoulement dans les conditions d'aujourd'hui.

**Mots clés :** hydrogéologie, géologie, modélisation, Paris, urbanisation.

## Hydrogeological modelling of the aquifers of Paris and consequences on underground structures

**Abstract :** Paris, as many large cities built on aquifers, shows a disturbed hydrogeological environment.

Land waterproofing reduces the natural recharge of the water table, then mainly driven by sewer network leakage. Underground intensive urbanisation covering more than 22 % of the Parisian surfaces (without Vincennes and Boulogne woods) influences groundwater flow. In addition, had to be taken in consideration the 20-30 millions cubic meters of water yearly pumped from the aquifer system.

Parisian aquifers are surveyed by IGC (Inspection General des Carrières) from the city of Paris, thanks to a 305 piezometers network, in particular close to the Seine river, in order to monitor and anticipate a flood event. In order to appraise such events a hydrogeological model of the Parisian underground had to be setup, including anthropic specification.

To achieve this model a 3D GIS of the Parisian underground has been done, integrating several topics:

- Parisian geology, including Campanian chalk and tertiary formation. 17 772 geological drillings have been used.
- Underground infrastructures: 20 000 residential car parks and cellars more than 140 public car parks conceded by the city of Paris, 197 km of underground subway and 46 km of RER.
- Water pumping. Only declared samples (12 millions cubic meters)
- Piezometric data from 669 piezometers over Paris and neighbouring towns

Before this thesis, no synthetic representation of Paris geology and underground has been done.

In a second time a mathematical model including Paris and suburbs has been built. This multilayer model consists of 11 layers interbedding, 6 aquifers level and 5 semi-permeable discretized through 607 171 square mesh (50 m side). Until now, this mathematical model allowed exploratory simulation in steady state showing flow structure of the present day hydrogeological situation.

**Keywords :** hydrogeology, geology, modelling, Paris, urbanization